

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do desempenho térmico, energético e económico de sistemas de climatização para um edifício bancário

Pedro Filipe Serras Mota

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2014

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do desempenho térmico, energético e económico de sistemas de climatização para um edifício bancário

Pedro Filipe Serras Mota

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de
Doutor Guilherme Carrilho da Graça (FCUL)

2014

Abstract

For the construction project of a German bank, a study of thermal, energetic and economic performance was conducted by simulating the building's computational model. Regarding the basic concept defined in the project, a variation of the concept of glazed façade and the HVAC system was considered. The study results were obtained by dynamic multizone simulation, using the application IDA Indoor Climate and Energy, IDA ICE, version 4.5. The simulation of the model was able to evaluate the indoor thermal comfort obtained in specific areas for the different simulated variants, in addition to serving as a method of predicting the specific energy consumption of the whole building. An economic analysis based on the net present value method was performed to clarify the decision of the constructor between the solutions under consideration and quantify the investments to be made. The results show the optimization potential of the thermal comfort conditions against the basis concept of the project. A considerable reduction of investment costs can be verified for one of the variants, but with associated disadvantages in energy performance.

Keywords:

Dynamic simulation, thermal comfort, energy consumption

Resumo

Para o projecto de construção de um banco alemão foi realizado um estudo de avaliação do desempenho térmico, energético e económico, através da simulação de um modelo computacional do edifício. Em relação ao conceito-base definido no projecto, foi considerada uma variação do conceito de fachada envidraçada e do sistema de climatização. Os resultados do estudo foram obtidos por simulação dinâmica multizona, usando a aplicação IDA Indoor Climate and Energy, IDA ICE, versão 4.5. A simulação do modelo permitiu avaliar o conforto térmico interior obtido em zonas específicas nas diferentes variantes simuladas, para além de servir como método de previsão dos consumos específicos de energia de todo o edifício. Uma análise económica com base no método do valor actual líquido foi realizada para clarificar a decisão de escolha do construtor entre as soluções em análise e quantificar os investimentos a efectuar. Os resultados demonstram a possibilidade de optimização das condições de conforto térmico em relação ao conceito-base do projecto. Uma redução considerável dos custos de investimento é verificável para uma das variantes definidas, mas com desvantagens no desempenho energético associado.

Palavras-chave:

Simulação dinâmica, conforto térmico, consumo energético

Abreviaturas e símbolos

CAV – constant air flow

COP – coefficient of performance

DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

Frs – factor de redução solar

g – factor solar

ICE – Indoor Climate and Energy

IPTG – Ingenieur Partnerschaft Technische Gebäudeausrüstung

PC – personal computer

PPD - predicted percentage of dissatisfied

PR – piso radiante

SFP – specific fan power

TR – tecto radiante

TRY – Test reference year

Tvis – transmitância visível

U – coeficiente de transmissão térmica, $W/(m^2K)$

Ug – coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados, $W/(m^2K)$

UTA – unidade de tratamento de ar

Uw – coeficiente de transmissão térmica da janela, $W/(m^2K)$

VDI – Verein Deutscher Ingenieure

λ – condutividade térmica, $W/(mK)$

Agradecimentos

À empresa Müller BBM pela oportunidade de estágio, em especial ao Eng. Alexander Schröter que me acompanhou durante todo o período do estágio.

Ao Doutor Guilherme Graça, pelo apoio prestado durante a elaboração da dissertação.

Ao Eng. Sven Moosberger da empresa EQUA, por me ter concedido uma licença temporária da aplicação IDA ICE.

Um agradecimento especial à família e amigos que me acompanharam ao longo desta etapa.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Descrição do objecto de estudo.....	2
3. Modelo computacional do edifício	3
4. IDA ICE.....	4
4.1 Modelo de Zona	4
4.2 Validação.....	5
5. Variantes de fachada envidraçada.....	6
6. Variantes de climatização	8
7. Elementos de construção.....	9
8. Variantes simuladas	10
9. Conforto térmico.....	12
10. Fontes internas de calor.....	13
10.1 Ocupação	13
10.2 Equipamento e iluminação	14
11. Ganhos Solares.....	15
12. Avaliação das condições gerais de conforto térmico.....	17
12.1 Espaços representativos para avaliação do conforto térmico.....	18
12.2 Representação de resultados de conforto térmico	19
12.3 Resultados da avaliação do conforto térmico	20
13. Perfis de carga de arrefecimento.....	26
14. Avaliação dos consumos energéticos	27
14.1 Energia final	27
14.2 Energia primária.....	30
15. Análise de rentabilidade económica.....	31
15.1 Custos de investimento.....	31
15.2 Custos operacionais	32
15.3 Método do valor actual líquido.....	33
16. Conclusões	35
17. Referências.....	36

Anexos

1.	Dados climáticos	1
1.1	Dia de verão VDI.....	1
1.2	Ano climático típico	2
2.	Considerações de simulação.....	3
3.	Fontes internas de calor.....	4
4.	Características do modelo	5
4.1	Operação de aquecimento e arrefecimento.....	5
4.2	Ventilação Mecânica	6
4.3	Equipamento de climatização.....	7
5.	Resultados da avaliação do conforto térmico	8
5.1	Outras áreas de estudo.....	8
5.2	Frequências de temperaturas operativas baixas	10
6.	Preços específicos de energia	11
7.	Custos específicos de investimento	11
8.	Relatórios de simulação IDA ICE	12
9.	Folhas de cálculo.....	14
9.1	Consumo energético	14
9.2	Rentabilidade económica.....	15
10.	Sombreamento da fachada.....	17

1. Introdução

O presente estudo tem como objectivo a avaliação do desempenho térmico, energético e económico para o plano de construção de um edifício bancário alemão, através de simulação dinâmica de um modelo computacional do edifício. A simulação de edifícios é uma forma rentável de analisar o desempenho de um edifício; vários indicadores de ambiente interior podem ser calculados para diferentes propósitos [1].

A partir do conceito base definido para o banco e tendo em conta as pretensões do construtor, foram avaliadas alternativas de optimização estabelecidas em relação à construção da fachada envidraçada e ao sistema de climatização, da qual resultaram quatro variantes para investigação. Usando a aplicação IDA Indoor Climate and Energy, IDA ICE, versão 4.5, foi definido um modelo do edifício para avaliação do desempenho das variantes.

O edifício bancário em questão é um edifício típico de escritórios; existe especial interesse em estudar o funcionamento das variantes de simulação para os gabinetes, tendo em conta os ganhos internos e ganhos solares destes, para avaliar as condições de ambiente interior. Uma boa qualidade do ambiente interior pode melhorar a produtividade do trabalho desempenhado e reduzir o absentismo [1].

No presente estudo, a avaliação do desempenho térmico do banco centra-se fundamentalmente na análise das condições de conforto térmico obtidas para a estação de arrefecimento. Esta avaliação é feita com base na simulação das variantes modeladas para um dia de verão intenso e para um ano climático típico. O consumo de energia do edifício inteiro também foi determinado para o ano climático típico. Uma análise económica com base no método do valor actual líquido foi realizada para comparar a rentabilidade económica das soluções.

2. Descrição do objecto de estudo

O objecto do presente estudo é o futuro edifício bancário de uma cidade alemã da região climática TRY 6 da ISO Test Reference Year (ver ponto 1.2 dos anexos). A construção do edifício de oito pisos está definida para a zona pedestre da baixa da cidade, no gaveto de duas ruas pedonais perpendiculares.

A fachada de maior comprimento do edifício está orientada a sudeste, com um valor de azimute de sul de -32° (negativo para Este). As fachadas do edifício orientadas a sudeste e a sudoeste são constituídas maioritariamente por envidraçados, ambas sujeitas a sombreamento parcial pelos edifícios vizinhos. As fachadas orientadas a nordeste e noroeste são adjacentes a dois edifícios já existentes.

O edifício tem uma funcionalidade típica de edifício de escritórios e é maioritariamente constituído por gabinetes comparáveis entre si ou de características equivalentes em termos de área de pavimento, ocupação, equipamento, entre outros.

A zona técnica do edifício está localizada no piso subterrâneo. O piso térreo está dividido em duas zonas: o foyer, com entrada principal a sudoeste, onde se encontra a recepção e gerência do piso e a zona de multibancos com entrada de acesso na fachada sudeste. No primeiro piso estão localizados gabinetes de atendimento a clientes. Existe uma sala de espera com envolvente envidraçada, com um corredor de acesso aos gabinetes. No segundo piso existe uma sala de reuniões, com envolvente envidraçada tanto a sudoeste como sudeste. Do segundo ao quinto piso localizam-se gabinetes administrativos. No sexto piso encontra-se uma sala de conferências. Na figura 3-II está representada a distribuição de zonas do edifício.

3. Modelo computacional do edifício

Usando a aplicação IDA ICE, versão 4.5, foi construído um modelo computacional do edifício. A representação do mesmo é apresentada na figura 3-I. O modelo de 35 zonas considera a localização e orientação do edifício assim como a obstrução exterior ao mesmo, as características térmicas da envolvente e das divisões internas do edifício, para além dos ganhos térmicos internos associados a cada zona. Os compartimentos com envolvente envidraçada foram simulados de forma detalhada, visto serem as zonas de maior interesse no estudo do conforto térmico. Para redução do tempo de computação, foram feitas simplificações em espaços interiores de reduzida importância para o presente estudo e espaços comparáveis foram combinados em divisões comuns, como é o caso das escadarias. A zona de multibanco foi englobada na área do foyer de entrada do banco. As características do modelo estão definidas no ponto 4 em anexo.

Fig. 3-I – Modelo de simulação

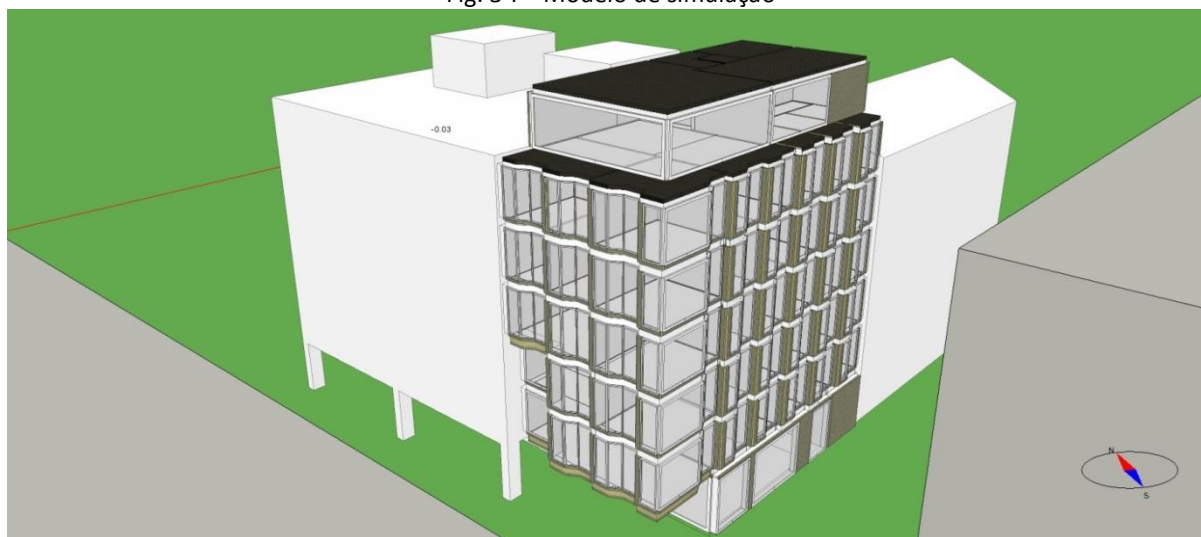


Fig. 3-II – Tipos de zona do edifício

4. IDA ICE

O IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) é uma aplicação de simulação dinâmica multi-zona para o estudo do ambiente interior de zonas individuais, assim como o consumo de energia de um edifício inteiro [3]. A ambição geral da aplicação é fornecer um ambiente integrado que torna simulações acessíveis a engenheiros com experiência limitada em modelação, levantando o nível de abstracção da equação para um nível de componentes [4].

A biblioteca modelo do IDA ICE foi escrita em Neutral Model Format (NMF), uma linguagem independente de programação para modelação de sistemas dinâmicos usando equações algébricas diferenciais [5].

O IDA ICE pode ser usado para cálculo de uma ampla gama de fenómenos [6]:

- balanço de cargas térmicas e de humidade para a zona inteira, incluindo contribuições específicas de: sol, ocupantes, equipamentos, iluminação, ventilação, dispositivos de aquecimento e arrefecimento, transmissão das superfícies, pontes térmicas;
- fluxo solar através de janelas considerando dispositivos de sombreamento locais e os de edifícios circundantes e outros objectos;
- temperatura de ar e das superfícies;
- temperatura operativa e temperatura média radiante consoante a localização de ocupantes. Para calcular a troca de radiação entre superfícies é usada a radiação de onda longa Stefan-Boltzmann completa com os factores de forma;
- temperatura operativa direccionada para estudo das condições de conforto assimétrico;
- índices de conforto PPD e PMV em função da localização de ocupantes;
- nível de luz do dia em locais arbitrários do compartimento à altura da mesa de trabalho;
- níveis de CO₂ e humidade do ar;
- estratificação da temperatura do ar em sistemas de ventilação de deslocamento;
- fluxo de ar, temperatura, humidade, CO₂ e pressão em locais arbitrários dos sistemas de ventilação;
- potências para os componentes do sistema primário e secundário;
- Custo total de energia com base em preços dependentes do tempo.

4.1 Modelo de Zona

A biblioteca do IDA ICE apresenta dois modelos de zona para simulação: um modelo de zona bastante detalhado, o Climate Model, e um modelo simplificado – o Energy Model.

Ambos os modelos de zona usam a mesma descrição do edifício; os componentes modelados dentro e em torno da zona são comuns para os dois modelos. Ambos os modelos têm equações de balanço de CO₂, humidade, massa de ar e energia. A humidade, o CO₂ e as cargas térmicas de pessoas são modelados de acordo com as equações da ISO 7730 [7].

A biblioteca tem modelos de componentes para sistemas primários e secundários de AVAC. Estes modelos são projectados para ter um número mínimo de parâmetros fornecidos e incluem equipamentos de controlo ideais [8]. O número de parâmetros foi mantido baixo, a fim de fornecer um

sistema de simulação completo com um esforço mínimo necessário. Nenhuma informação específica de *design* é dada para superfícies de aquecimento e arrefecimento, entre outros, para além da eficiência [7].

Climate Model

O modelo de zona detalhado com radiação de onda longa Stefan-Boltzman foi desenvolvido para estudos de ambiente interior. Com este modelo é possível estudar a ventilação de deslocamento. Para estudar a influência da localização de um ocupante na zona, é calculada a temperatura média radiante ponderada com os factores de forma do ponto de localização para as superfícies da zona [7]. Temperaturas operativas direccionadas, em seis direcções, estão disponíveis na zona para o estudo da assimetria de temperaturas; O Climate Model está actualmente limitada a zonas com geometria rectangular [9].

Energy Model

O modelo de zona detalhado desenvolvido para estudos do ambiente interior pode ser desnecessariamente complexo e demorado para simulações energéticas anuais multizona. O modelo de zona simplificado foi desenvolvido para possibilitar o acelerar da execução de simulações de energia. O Energy Model tem um grau de precisão mais convencional; o tempo de cálculo será mais curto, ou no limite, igual [9]. A radiação de onda longa entre superfícies é modelada numa abordagem de temperatura média radiante. Outras características do modelo são as mesmas que no modelo de zona detalhado, como por exemplo, as cargas térmicas de ocupantes são modelados com o mesmo nível de detalhe [7].

4.2 Validação

Durante o processo de desenvolvimento da aplicação IDA ICE foi efectuada verificação e validação; foram realizadas medições e estudos comparativos com outros softwares. O cálculo do factor de forma foi provado por comparação com soluções analíticas conhecidas. O balanço de energia foi examinado [7]. No âmbito de [8] a biblioteca dos modelos dos componentes do edifício foi testada e validada no enquadramento de validação internacional, com base em medições e comparações com outros programas. A ferramenta IDA ICE foi validada em casos de teste definidos para prEN 13791 [10]. Em [11] é concluído que IDA ICE 4.0 tem um bom desempenho geral nos casos de teste por comparação aos outros modelos e programas de software. A ferramenta IDA ICE foi validada em casos de teste definidos para a norma CEN EN 15255-2007, com um desempenho dentro dos limites de erro de 0,5 K para a temperatura operativa máxima e de 5% para a potência de refrigeração máxima e média; para a norma CEN EN 15265-2007, obteve-se um desvio do nível precisão para aquecimento e arrefecimento de 0 a 8% e 0 a 11%, respectivamente [12].

5. Variantes de fachada envidraçada

As fachadas sudeste e sudoeste do banco são constituídas maioritariamente por envidraçados – cerca de 70% da área envolvente das mesmas. O conceito original do projecto consiste numa fachada de vidro triplo com dispositivo de protecção solar entre dois vidros (os mais exteriores). Tendo em conta as preocupações levantadas pelo construtor face à utilização e manutenção deste dispositivo, foi também considerada uma alternativa mais convencional, a utilização de um dispositivo interior de protecção solar. Apesar de ser mais eficiente no controlo dos ganhos solares, a aplicação dum dispositivo exterior de protecção solar não foi ponderada como opção para o planeamento da fachada, principalmente por alterar a aparência visual do edifício. De seguida descrevem-se as duas soluções simuladas para o conceito de fachada envidraçada.

Fachada envidraçada 1

O conceito base do é uma solução de fachada de vidro triplo de isolamento térmico ECKLITE SC[®], de factor solar $g = 52\%$ e coeficiente de transmissão térmica de envidraçados de $U_g = 0.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, que integra um dispositivo de protecção solar entre dois vidros. O dispositivo consiste num estore veneziano operado electricamente, com lâminas metálicas delgadas, móveis e rotacionais, para proporcionar um controlo solar eficiente, evitando o sobreaquecimento e brilho excessivo na zona. O ajuste do ângulo das lâminas permite ao usufrutuário uma exposição de luz natural resultante que satisfaça as necessidades visuais do mesmo no desempenho da sua função, com menor recurso à iluminação artificial.

Fachada envidraçada 2

Tendo em conta a pretensão do construtor, foi concebida como alternativa a utilização de um dispositivo de sombreamento interno. Esta protecção consiste num estore de lâminas metálicas de cor clara, móveis e rotacionais. Considerando a menor redução dos factores solares envidraçados que este dispositivo oferece quando activado, foi definida a variante como uma fachada envidraçada tripla de controlo solar, com $g = 24\%$, composta por vidro com capa de controlo solar SCG COOL-LITE[®], vidro SGC PLANILUX[®] e vidro SGC PLANITHERM[®], do exterior para o interior, respectivamente.

Na tabela seguinte, encontram-se comparadas as características das duas variantes de fachada.

Tabela 5-I – Características das fachadas envidraçadas

Variante	Fachada 1	Fachada 2
Vidro triplo	de isolamento térmico	de controlo solar
$U_w, \text{W/(m}^2\text{K)}$	1,1	1,1
g	0,52	0,24
T_{vis}	0,70	0,45
Dispositivo	entre vidros	interior
F_{rs}	0,2	0,7
Preço, €/m ²	500	280

As duas fachadas apresentam as mesmas características de transmissão térmica dos envidraçados: o coeficiente global da janela para as duas variantes é $U_w = 1.1 \text{ W/m}^2/\text{K}$, incluindo caixilho.

O factor de redução solar pelo dispositivo de protecção solar Frs determinado para as duas variantes foi calculado considerando uma posição típica das lâminas do estore num ângulo de 45° , para uma altura solar de 30° .

Com o dispositivo de protecção solar móvel totalmente aberto, a fachada envidraçada 1 apresenta um maior factor solar dos envidraçados do que a fachada alternativa, respectivamente, $g=52\%$ e $g=24\%$:

- Na estação de aquecimento, a maior quantidade de energia solar transmitida através da fachada do conceito original contribuirá, em teoria, para o aquecimento útil ambiente das zonas térmicas durante esta estação e os resultados obtidos por simulação deverão indicar um menor consumo energético para aquecimento do edifício simulado com esta fachada.
- Na estação de arrefecimento, quando não há necessidade de actuação do estore, os maiores ganhos solares através da fachada 1 implicarão uma maior necessidade de arrefecimento das zonas.

Em situação de elevada incidência de radiação solar nos vão envidraçados, a fachada 1 com dispositivo de protecção solar optimizado tem maior capacidade de evitar os ganhos solares – os factores solares resultantes dos envidraçados com o dispositivo activado são $g=10\%$ e $g=17\%$ para a fachada 1 e 2, respectivamente. Com o dispositivo activado existe menor necessidade de arrefecimento para a zona com solução de fachada 1. Prevê-se que, para a fachada 2, seja necessária uma maior potência de arrefecimento para obtenção do mesmo nível de conforto térmico no edifício.

A fachada tripla de controlo solar caracteriza-se também por uma menor passagem de luz natural para o gabinete – a transmitância visível pela fachada 2 é $T_{vis} = 45\%$, enquanto que a variante 1 é $T_{vis} = 70\%$. Espera-se, portanto, que a menor capacidade de aproveitamento da iluminação natural no conceito de fachada número dois conduza a um maior consumo eléctrico para iluminação.

A fachada tripla de controlo solar reduz em metade o investimento – os custos específicos para esta opção rondam os 280 € por m^2 de fachada envidraçada, enquanto que para a fachada inicialmente prevista é necessário um investimento de 500€/m^2 . A avaliação dos resultados da simulação de conforto térmico e consumo energético, assim como a respectiva análise económica, irão mostrar se a vantagem económica de investimento da fachada alternativa resulta efectivamente numa poupança económica, face aos prováveis maiores custos energéticos para aquecimento e eléctricos de iluminação para esta fachada, entre outros.

6. Variantes de climatização

Para manter, em permanência, as zonas térmicas do edifício a uma temperatura interior de referência durante as estações de aquecimento e de arrefecimento, assim como assegurar a qualidade do ar interior, foram consideradas duas soluções de climatização relevantes.

Variante P – piso radiante e sistema de ventilação mecânica

A variante P corresponde ao conceito de climatização proposto no projecto do banco. É usado o sistema ClimaLevel® – piso elevado com sistema de piso radiante para aquecimento ou arrefecimento da zona e um sistema de ventilação para regulação da qualidade de ar. A variante original tem também projectada a necessidade de colocação de painéis para atenuação acústica dos espaços – 40% da área de pavimento dos gabinetes e 60% da área da sala de conferências e de reuniões.

A renovação de ar interior nos diferentes espaços ventilados do edifício faz-se por meio de um sistema mecânico; o ar novo é ventilado por condutas presentes no espaçamento do piso elevado e é insuflado nos gabinetes por difusores colocados ao longo do pavimento próximo da fachada envidraçada. Os caudais de ar de insuflação e de extracção para cada tipo de espaço do edifício bancário estão descritos no ponto 4.2 dos anexos.

Um sistema activo de tubagens de água é incorporado na camada de betonilha do piso elevado. Através deste sistema, a água que percorre o circuito pode aquecer ou arrefecer o pavimento, que, por radiação (maioritariamente), condução e convecção permite manter a temperatura de referência do ar interior, para obtenção de conforto térmico. A potência máxima de arrefecimento do sistema de piso radiante é 35 W/m^2 . As características técnicas do piso radiante estão descritas em anexo – ponto 4.3.

Variante T – tecto radiante e sistema de ventilação mecânica

A renovação de ar é feita, como na variante inicial, por ventilação mecânica através de condutas presentes na cavidade de ar do piso elevado.

Nesta variante, o piso não apresenta sistema com superfície activa para aquecimento ou arrefecimento. Para manter a temperatura de referência no interior dos compartimentos é planeada a colocação de painéis radiantes para aquecimento e arrefecimento; os painéis são instalados abaixo do tecto de betão exposto, existindo um espaçamento de ar entre o tecto e a superfície posterior não isolada do painel. A área de superfície radiante contribuiu para manter as condições ambientais interiores de conforto. A potência máxima de arrefecimento para as condições padrão é 128 W/m^2 . As características técnicas do tecto radiante estão descritas no ponto 4.3 dos anexos.

A utilização do painel de tecto radiante contribui para a diminuição de ruído no gabinete, eliminando-se a necessidade de fixação de painéis de atenuação acústica, condição projectada para a variante base.

7. Elementos de construção

As soluções construtivas de envolvente exterior e interior usadas na simulação foram caracterizadas tendo em conta uma simplificação das componentes de construção do projecto, considerando apenas as camadas relevantes para as características térmicas de cada solução construtiva. De seguida descrevem-se os elementos de construção simulados. Os coeficientes de transmissão térmica dos elementos estão listados na tabela.

A envolvente opaca exterior a sudeste e sudoeste é uma fachada rainscreen mas foi simplificada numa construção, do interior para o exterior, em betão armado e lã mineral $\lambda=0.035 \text{ W/(mK)}$, com espessuras de 250 mm e 120 mm, respectivamente. As fachadas a nordeste e noroeste são, por sua vez, constituídas com um incremento de 40 mm à espessura do isolante térmico. Para as paredes exteriores do piso subterrâneo, define-se uma camada de betão armado com espessura de 350 mm e 120 mm de lã mineral $\lambda=0.040 \text{ W/(mK)}$. As paredes divisórias dos gabinetes são paredes de placas de reboco com uma camada interior de 40 mm de lã mineral $\lambda=0.040 \text{ W/(mK)}$.

Na variante com sistema de piso radiante, o pavimento interior em piso elevado é definido, da base para o topo, com 300 mm de betão armado, 30 mm de lã mineral $\lambda=0.040 \text{ W/(mK)}$, uma cavidade de ar de 60 mm, camada de granulado de borracha com 10 mm, 65 mm de betonilha onde é incorporado o sistema de piso radiante e, nos gabinetes, colocação de tapete (5 mm). O pavimento do foyer tem a camada de betonilha com uma espessura de 40 mm e aplicação de 30 mm de pedra natural.

Na variante em que os gabinetes incorporam um sistema de tecto radiante, a parte superior do piso interior é modificada visto que não incorpora o sistema de piso radiante. Acima da cavidade de ar, o piso elevado é definido como uma camada de 20 mm de placa de fibra de gesso e 30 mm de betonilha.

O pavimento exterior em contacto com o solo do piso subterrâneo do edifício é constituído por 120 mm de lã mineral $\lambda=0.040 \text{ W/(mK)}$, 500 mm de betão armado e 60 mm de betonilha. A zona de espera, com pavimento exterior em contacto com o ar, difere do piso interior de pedra natural usado no foyer. Abaixo do espaçamento de ar, foi definida uma camada de betão com 350 mm e 120 mm de lã mineral $\lambda=0.035 \text{ W/(mK)}$.

O tecto exterior é simulado como 200 mm de betão armado e 200 mm de lã mineral $\lambda=0.035 \text{ W/(mK)}$.

Tabela 7-I – Coeficientes de transmissão térmica dos elementos modelados

Construção	U (W/(m ² K))
Fachada sudoeste e sudeste	0,27
Fachada noroeste e nordeste	0,21
Fachada subterrânea	0,30
Gabinete	0,71
Piso subterrâneo	0,29
Piso Climalevel em contacto com o ar	0,28
Piso Climalevel	0,70
Piso Climalevel com pedra	0,74
Piso elevado (variante tecto radiante)	0,73
Tecto	0,17

8. Variantes simuladas

Os conceitos para avaliação por simulação dinâmica são apresentados de seguida. Os conceitos gerais definidos resultam da combinação das duas soluções de fachada envidraçada e dos dois sistemas de climatização descritos. A identificação dos quatro conceitos resulta da junção das designações das variantes que os compõem.

As áreas de piso radiante e tecto radiante definidas para cada conceito foram determinadas por testes de simulação do modelo. Para cada variante, foi considerado que os gabinetes, sala de reuniões e de conferências possuem o mesmo tipo de equipamentos de climatização.

Variante P1

A variante P1 corresponde ao conceito base definido no projecto do edifício bancário: sistema de piso radiante no piso elevado com ventilação mecânica e fachada transparente constituída por vidro triplo de isolamento térmico com dispositivo de protecção solar entre vidros. O sistema de piso radiante simulado estende-se por uma área equivalente a 90% da área do pavimento de cada zona térmica, correspondendo a uma potência máxima de arrefecimento de 32 W/m^2 de pavimento.

Variante P2

A variante P2 combina a solução técnica de piso radiante com a fachada de dispositivo interior de protecção solar. Tendo em conta que esta variante simulada conserva a mesma área de piso radiante do conceito base, é possível analisar a influência directa que a fachada com dispositivo de sombreamento interior tem na esperada redução do conforto térmico.

Variante T1

O conceito inicial planeado é alterado quanto à superfície activa para aquecimento e arrefecimento do compartimento: é usado um sistema de tecto radiante em detrimento do sistema de piso radiante. A área de tecto radiante colocada em cada zona térmica corresponde a 40% da área de pavimento da mesma, resultando numa potência máxima de arrefecimento para cada compartimento de 51 W/m^2 .

Variante T2

Para além da alteração do equipamento de climatização do conceito base optando-se por um tecto radiante, é também aplicada a solução de fachada com dispositivo de protecção solar interior. Para esta escolha existe necessidade de compensar a menor eficácia do dispositivo interior no controlo dos ganhos solares com o aumento da potência de arrefecimento instalada para 77 W por m^2 de pavimento; a área de superfície activa do tecto radiante correspondente a 60% da área de pavimento, ou seja, um acréscimo de 50% em relação à área de tecto radiante da variante anterior.

Tabela 8-I – Variantes simuladas

Variante	Superfície activa	Fachada envidraçada
P1	Piso radiante, 90% da área de pavimento	$g = 0.52$, estore veneziano entre vidros
P2	Piso radiante, 90% da área de pavimento	$g = 0.24$, estore de lâminas interior
T1	Tecto radiante, 40% da área de pavimento	$g = 0.52$, estore veneziano entre vidros
T2	Tecto radiante, 60% da área de pavimento	$g = 0.24$, estore de lâminas interior

Para o foyer de entrada e sala de espera do 1º andar, não foi efectuada qualquer variação do equipamento técnico do conceito base, sendo adoptada a solução de piso radiante para os dois espaços em todas as variantes descritas anteriormente.

Pelo teste do modelo de simulação verificou-se que é aconselhável a instalação de componentes técnicos em certos compartimentos para além dos projectados. Apesar da menor relevância para as condições de conforto térmico, os corredores do 2º e 6º piso apresentam uma elevada área envolvente de envidraçados e em ambos os casos se verificou a necessidade de colocação de piso radiante de forma a evitar o sobreaquecimento no verão. Não existe variação dos equipamentos dos corredores em nenhuma das variantes acima descritas.

9. Conforto térmico

O conforto térmico é um estado que reflecte a satisfação da pessoa com o ambiente térmico que a envolve; depende de factores ambientais: temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e humidade do ar e de factores pessoais: do nível de actividade física e vestuário da pessoa (ASHRAE Standard 55, 2003). Tendo em conta estes factores, a ISO 7730 define um índice que fornece informação quantitativa de desconforto térmico – PPD, “predicted percentage of dissatisfied” – prevendo a percentagem de pessoas que, num dado ambiente interior, terão uma sensação térmica muito quente ou muito fria. De acordo com a mesma norma, o ambiente térmico interior pretendido para um espaço pode ser especificado em diferentes categorias, com o valor previsto de pessoas em desconforto térmico PPD associado:

Categoria	PPD, %
I	< 6
II	< 10
III	< 15

Tabela 9-I – PPD correspondente a cada categoria

De acordo com a norma EN 15251, para uma combinação de actividade física e vestuário típicos de um gabinete, entre outros pressupostos, é possível estabelecer um intervalo de temperaturas operativas para cada categoria; os intervalos de temperaturas operativas para a estação de arrefecimento e de aquecimento de cada categoria estão apresentados na tabela 9-II e são aplicáveis a gabinetes, salas de conferências e outros espaços com um tipo de ocupação semelhante.

Categoria	Temperatura Operativa (°C)	
	Estação de arrefecimento	Estação de aquecimento
I	24,5 ± 1,0	22 ± 1,0
II	24,5 ± 1,5	22 ± 2,0
III	24,5 ± 2,5	22 ± 3,0

Tabela 9-II – Intervalos de temperatura operativa de cada categoria

Para edifícios novos com arrefecimento e aquecimento mecânico, o nível de conforto térmico desejável corresponde à categoria térmica II [1]. Assim, o ambiente térmico dos gabinetes, salas de conferências e de reuniões deverá estar permanentemente compreendido entre os limites de temperatura operativa definidos pela categoria – temperatura operativa abaixo dos 26° C na estação de arrefecimento e acima dos 20°C na de aquecimento. Por considerações económicas e/ou ambientais é aceitável que a temperatura seja mantida fora do intervalo específico durante períodos de tempo limitados, nomeadamente os correspondentes a situações extremas pontuais [2]. De outra forma, a instalação de AVAC teria uma capacidade de refrigeração e/ou aquecimento relativamente alta, com maiores custos de investimento, operação e manutenção associados.

10. Fontes internas de calor

A descrição e caracterização dos ganhos internos associados a cada tipo de compartimento do banco está listada no ponto 3 dos anexos e exibida nas figuras seguintes.

10.1 Ocupação

Os gabinetes de administração, com uma área de 13 m^2 , estão desenhados para acomodar dois trabalhadores. Os gabinetes administrativos na junção das duas fachadas (gabinetes do “canto”) têm uma densidade de ocupação menor: à área de 20 m^2 corresponde apenas um único posto de trabalho.

Os gabinetes de consultadoria, também com 13 m^2 de área aproximada, acomodam um trabalhador, mas é assumido que, em média, estará sempre adicionalmente um cliente dentro do gabinete durante o horário laboral, pelo que a densidade ocupacional é equivalente à dos gabinetes administrativos.

A sala de conferências tem capacidade para 19 ocupantes e a sala de reuniões permite reunir um grupo de 10 ocupantes. No foyer do piso térreo, existem sempre pelo menos 2 funcionários destacados na área da recepção/gerência do piso; define-se a presença média de mais 3 ocupantes. Na sala de espera para clientes assume-se uma assiduidade média de 4 ocupantes.

Na figura 10-I é ilustrada a densidade ocupacional prevista para as várias áreas do edifício. Os gabinetes administrativos da fachada sudeste têm uma densidade ocupacional relativamente alta, $0.16 \text{ ocupantes/m}^2$. A sala de reuniões e a de conferências são as áreas de maior densidade ocupacional, com 0.51 e $0.27 \text{ ocupantes por área de pavimento}$, respectivamente.

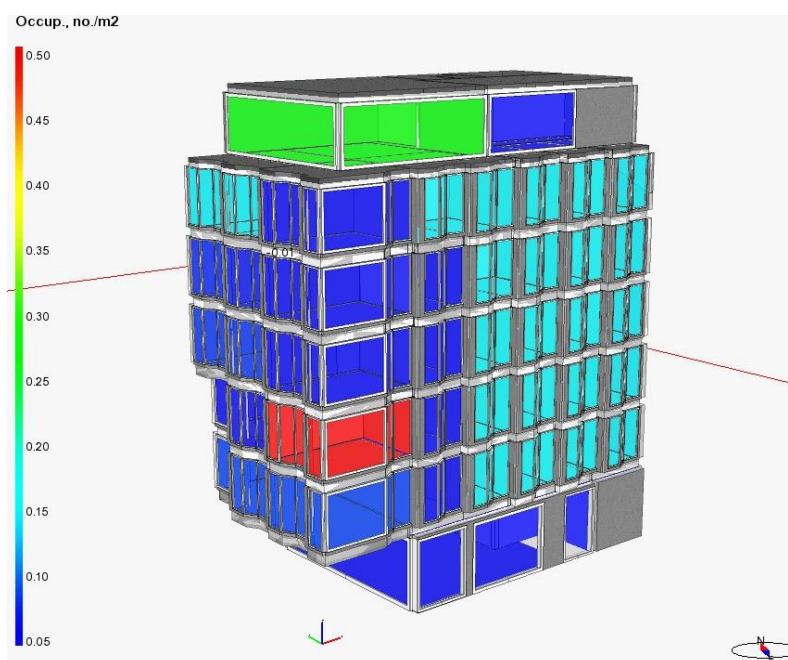


Fig. 10-I – Densidade ocupacional dos compartimentos

Os parâmetros definidos para o vestuário e actividade metabólica de um trabalhador típico do banco estão descritos em anexo – ponto 2.

10.2 Equipamento e iluminação

A distribuição do equipamento computacional por divisão do banco, assim como a distribuição das potências de iluminação artificial instalada por área de divisão encontram-se listadas em anexo, ponto 3.

Os ganhos internos específicos resultantes estão representados na figura 10-II. Os gabinetes administrativos bi-ocupados têm associadas cargas térmicas de equipamento aproximadas de 26 W/m^2 e potências de iluminação de 17 W/m^2 . A sala de reuniões apresenta os maiores ganhos internos de equipamento associados, cerca de 26.5 W/m^2 , com uma potência de iluminação de 18 W/m^2 .

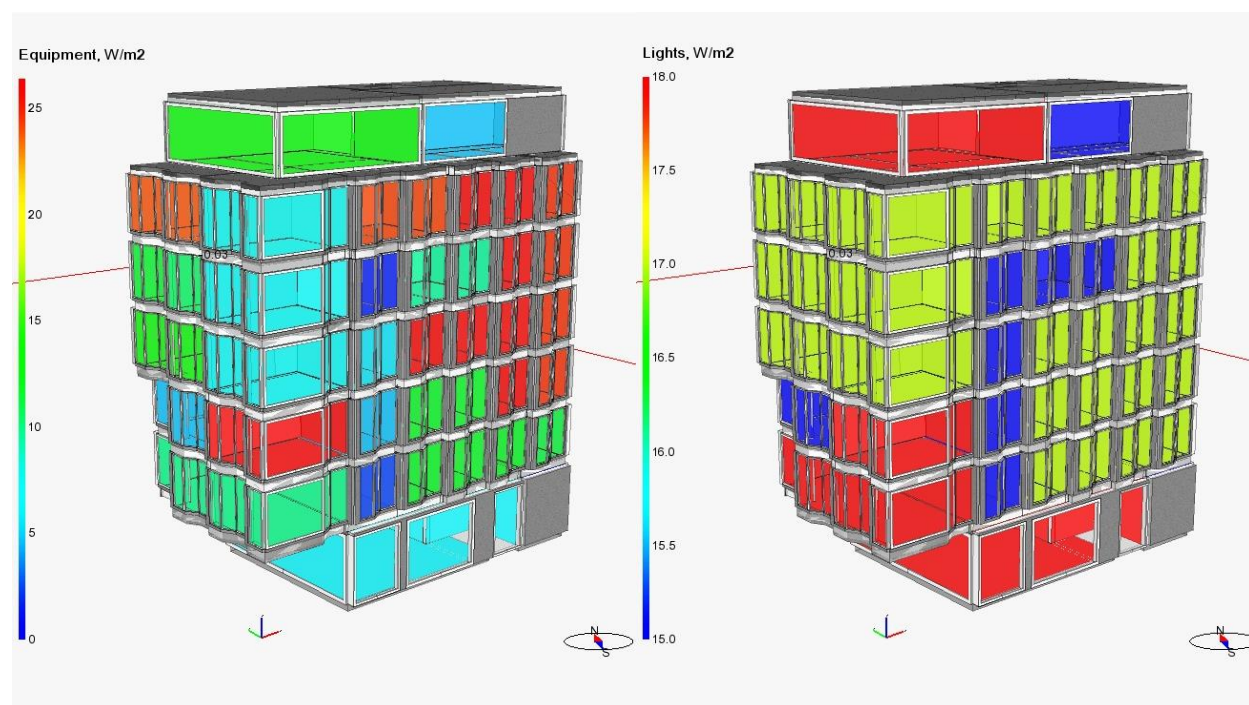
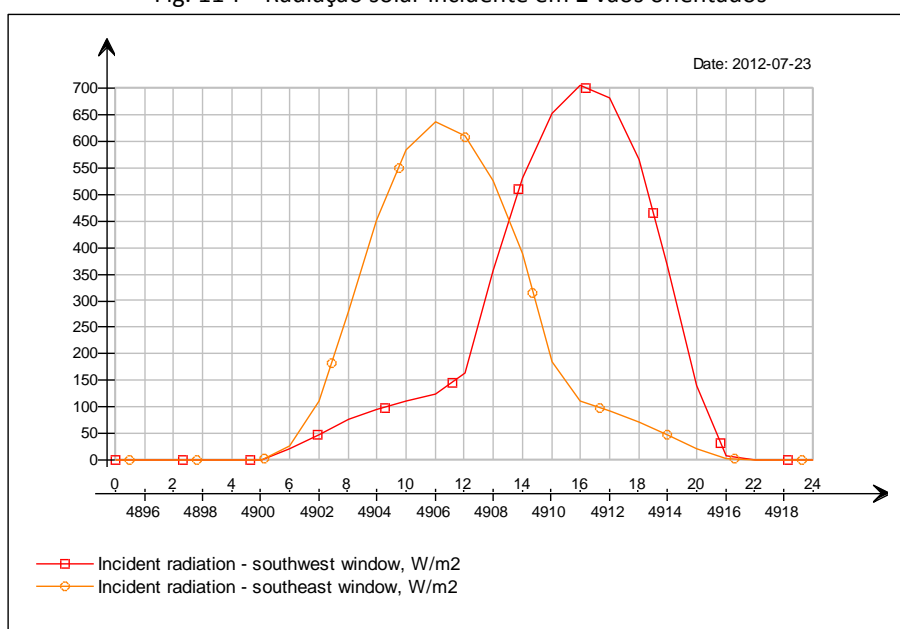


Fig. 10-II – Distribuição de equipamentos e iluminação no modelo

11. Ganhos Solares

As duas fachadas envidraçadas do edifício estão orientadas respectivamente a sudeste e sudoeste. Na figura 11-I é traçada a radiação solar incidente em dois vãos envidraçados orientados nessas duas direcções, do gabinete do “canto” do 5º piso, para o dia de elevada radiação solar representado pelo VDI 2078 (ver ponto 1.1 dos anexos). O pico de radiação global incidente num vão envidraçado disposto a sudeste é de cerca de 640 W/m² e ocorre às 11:00 h, enquanto que num vão envidraçado na fachada a sudoeste do mesmo gabinete, um pico de radiação de 700 W/m² verifica-se às 16:00 horas.

Fig. 11-I – Radiação solar incidente em 2 vãos orientados



Na figura 11-II são reproduzidos os ganhos solares máximos por área de compartimento ocorridos durante o dia VDI, para a fachada do conceito base P1 – fachada envidraçada tripla de g=52% e dispositivo de sombreamento entre vidros.

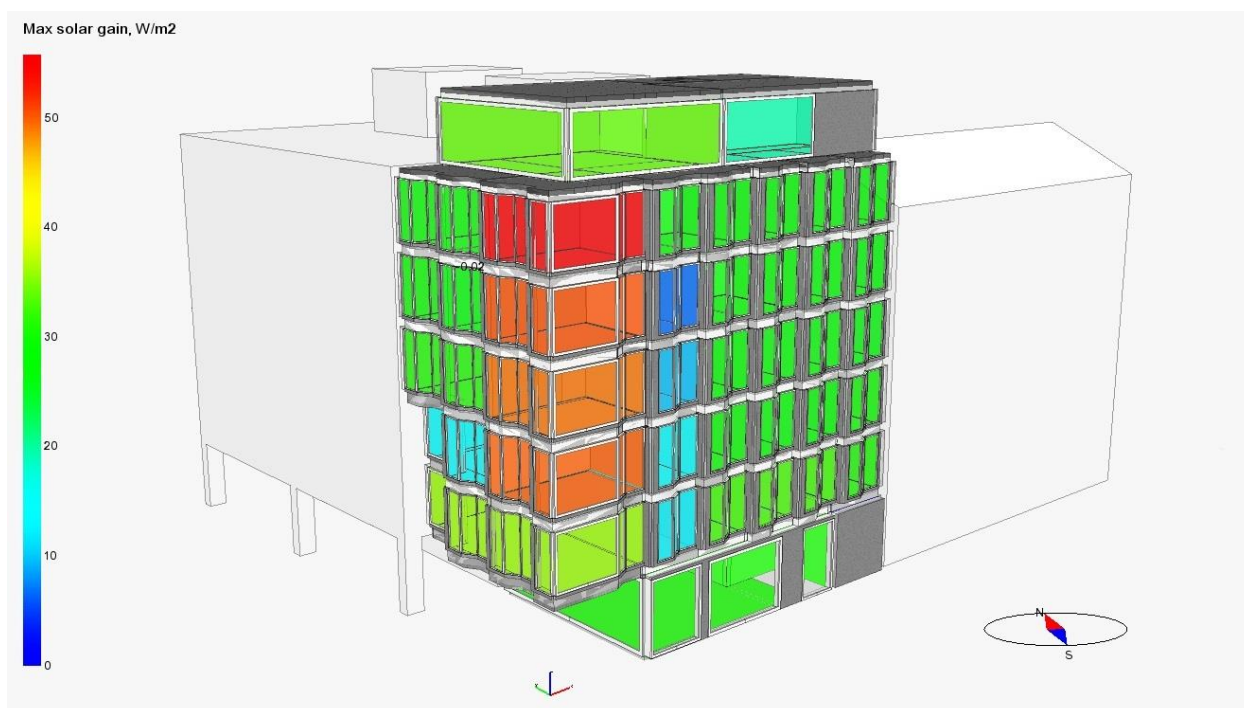


Fig. 11-II – Ganhos solares máximos por área de compartimento para o dia de verão VDI, variante P1

Os compartimentos com envoltente envidraçada nas duas orientações de fachada estão bastante expostos à radiação solar e apresentam os maiores ganhos solares verificados no edifício. No presente exemplo do dia de verão VDI, no gabinete administrativo individual do 5º andar (gabinete do “canto”) ocorre um ganho solar específico máximo de cerca de 56 W por área de pavimento do gabinete. Para a sala de reuniões e sala de conferências existe, respectivamente, um ganho solar máximo específico de 50 W/m^2 e 34 W/m^2 . Para os gabinetes bi-ocupados da fachada sudeste verifica-se um máximo de ganhos solares entre 28 e 33 W/m^2 para toda a fachada – devido à altura solar, o sombreamento na fachada do banco pelos edifícios vizinhos é praticamente nulo para o dia representado. No ponto 10 dos anexos é exibido o sombreamento parcial do edifício para dois dias, 20 de Junho e 22 de Setembro.

12. Avaliação das condições gerais de conforto térmico

Segundo a norma EN 15251, a temperatura operativa deve ser usada para a apreciação das condições de conforto térmico quando temperaturas de grandes superfícies diferem significativamente da temperatura média do ar, como acontece com as grandes áreas de envidraçados, tectos e pisos radiantes dos compartimentos do edifício.

Para avaliar o desempenho do edifício inteiro, espaços representativos têm de ser simulados [1]. A norma EN ISO 7730 descreve métodos para avaliação das condições gerais de conforto térmico obtidas por simulação dinâmica dos espaços num longo período de tempo. O método usado no presente estudo é o cálculo do número de horas (frequência) durante o horário de ocupação em que a temperatura operativa está fora do intervalo da categoria de conforto especificada.

A norma EN 15251 quantifica desvios aceitáveis para os critérios de avaliação do ambiente térmico. Para o método de análise estabelecido anteriormente, o número máximo de horas em que a temperatura operativa pode estar fora dos limites da categoria térmica num compartimento corresponde a 5% do tempo de ocupação dessa zona.

Os conceitos definidos para o edifício no ponto 8 foram testados por simulação dinâmica para avaliação do desempenho térmico num dia de verão intenso e ao longo de um ano climático típico (ver dados climáticos – ponto 1 dos anexos). Tendo em conta que o presente estudo incide particularmente na análise das variantes na estação de arrefecimento, é necessário avaliar o número de horas durante o horário laboral em que a temperatura operativa é superior a 26º (categoria térmica II). Definindo a estação de arrefecimento como um período de 3 meses e considerando o desvio recomendado de 5% do horário laboral para a temperatura operativa, os compartimentos não devem verificar uma ocorrência de temperaturas operativas acima de 26ºC superior a 24 horas.

Para a avaliação do desempenho térmico do edifício foi considerada a totalidade das cargas térmicas de equipamento, ocupação e iluminação definidas no modelo de simulação. O dispositivo de protecção solar de cada compartimento é activado quando a irradiância global incidente na envolvente envidraçada do compartimento é superior a 200 W/m². A iluminação artificial nos compartimentos é activada para valores de iluminância inferiores a 500 lux. As condições de simulação estão descritas no ponto 2 em anexo.

12.1 Espaços representativos para avaliação do conforto térmico

A avaliação das condições gerais de conforto térmico para as diferentes variantes foi considerada em detalhe para compartimentos representativos de zonas típicas do edifício, com diferentes funções e orientações. Tendo em conta que esta análise tem foco principal na estação de arrefecimento, para gabinetes comparáveis entre si foram escolhidos como gabinetes representativos os de maior cota, por serem áreas mais críticas em termos de ganhos solares.

A partir da visualização da figura dos ganhos solares máximos do edifício obtidos para o dia VDI e dos dados e figuras de ocupação e equipamentos, foram seleccionadas as áreas distinguidas na figura 12-I para avaliação dos conceitos globais e apresentação de resultados. Como o modelo detalhado “Climate Model” da biblioteca do IDA ICE desenvolvido para estudos de ambiente térmico está actualmente limitado a zonas de geometria rectangular, a geometria da fachada foi simplificada para os compartimentos seleccionados para avaliação do desempenho térmico, respeitando as áreas de envidraçados e de parede exterior, assim como as áreas de pavimento das zonas.

Gabinete administrativo 5.02:

Compartimento bi-ocupado do quinto andar, com fachada envidraçada a sudeste. É o gabinete “modelo”, repetindo-se ao longo de toda a fachada sudeste num total de 16 gabinetes. Apresenta cargas térmicas específicas consideráveis para equipamento e ocupação. Os gabinetes de consultoria apenas diferem em termos de equipamento. Os gabinetes administrativos de 4 ocupantes são tendencialmente proporcionais ao gabinete modelo em área de pavimento e de envoltente envidraçada, caudal de ventilação, ocupação e equipamentos. O mesmo não acontece com o gabinete descrito em seguida;

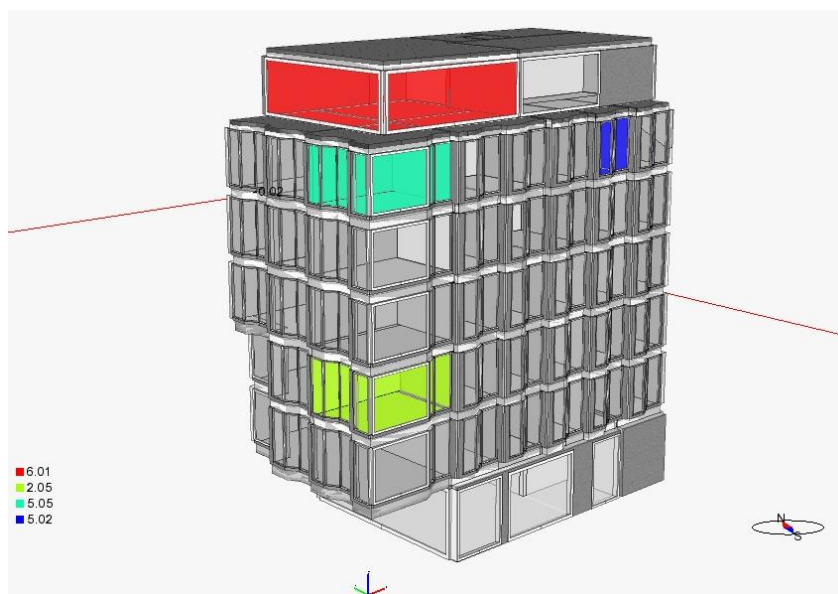


Fig. 12-I – Áreas seleccionadas para estudo detalhado do conforto térmico

Gabinete administrativo individual 5.05:

Gabinete do “canto” com elevada envolvente envidraçada, tanto a sudoeste como a sudoeste, apresenta elevados ganhos solares. Têm baixa densidade ocupacional e de equipamentos;

Sala de reuniões 2.05:

A sala presente no segundo andar apresenta elevada densidade ocupacional;

Sala de conferências 6.01:

Este compartimento foi escolhido pela combinação de todos os motivos acima descritos – elevados ganhos solares, de ocupação e de equipamento.

12.2 Representação de resultados de conforto térmico

Para cada um dos compartimentos considerados anteriormente, foram avaliadas as condições de conforto térmico obtidas para as diferentes variantes testadas. Os resultados são representados de seguinte modo:

Gráfico das temperaturas operativas diárias de verão:

São comparadas as temperaturas operativas registadas por simulação das quatro variantes do modelo do edifício descritas no ponto 8 para um dia quente de verão – ficheiro climático VDI. A temperatura do ar exterior ao longo do dia está representada a verde. O fundo cinzento identifica o horário de ocupação do compartimento, com os diferentes tons a representar as categorias de conforto térmico de acordo com EN 15251.

Gráfico da frequência anual de temperaturas operativas elevadas:

O gráfico representa a frequência horária com que uma determinada temperatura operativa superior a 25°C ocorre durante o ano climático típico, considerando o horário de ocupação do edifício. As frequências da temperatura do ar exterior para o ano climático típico estão representadas a verde.

12.3 Resultados da avaliação do conforto térmico

Na figura seguinte está exemplificada a distribuição de temperaturas operativas máximas no edifício, para a simulação do modelo do conceito-base de climatização P1 no dia de verão VDI. Existe um sobreaquecimento dos gabinetes de cota superior. Nos pisos inferiores não se verificam temperaturas tão críticas, em especial para os gabinetes de consultoria, devido também à menor carga térmica de equipamentos.

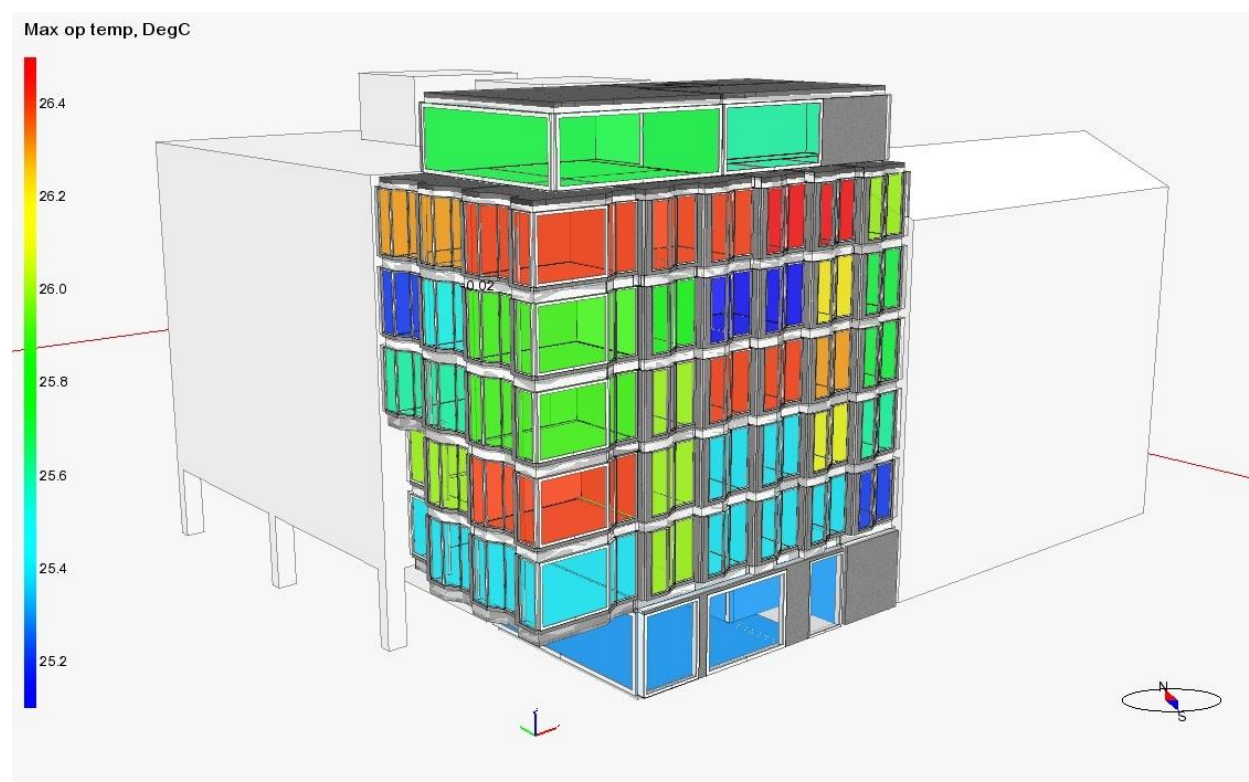
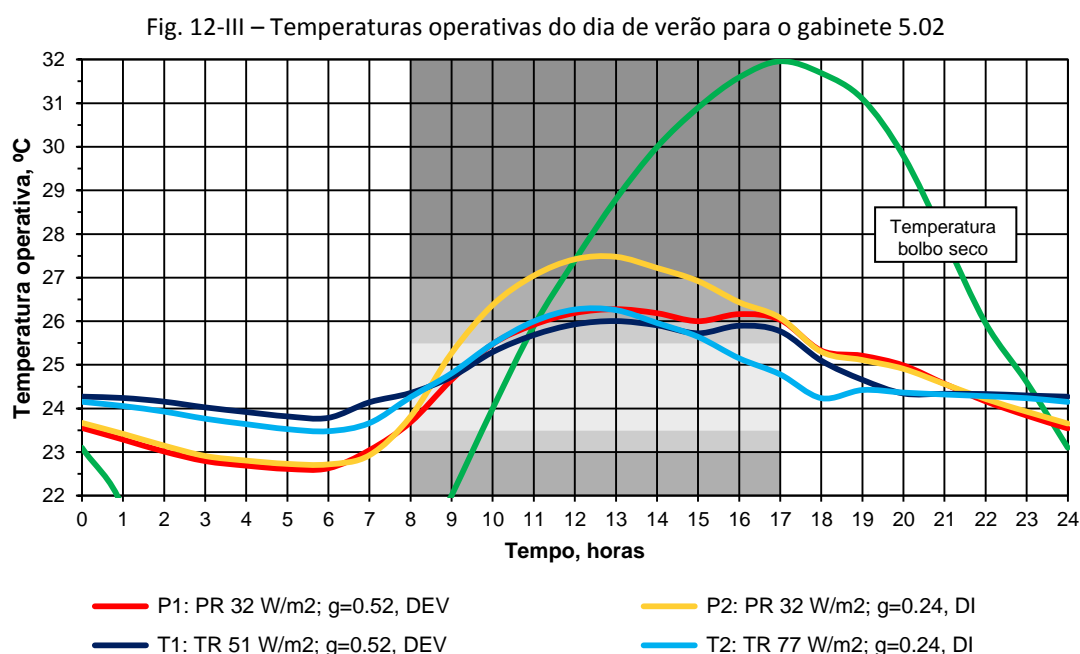


Fig. 12-II – Temperaturas operativas máximas do dia de verão para a variante P1 do edifício

Gabinete 5.02

A variação diária da temperatura operativa do gabinete da fachada sudoeste 5.02 está representada na figura 12-III, para as 4 variantes simuladas no dia de verão VDI.

A variante P2 (a amarelo) com sistema de piso radiante e fachada envidraçada de controlo solar com dispositivo de protecção solar interior destaca-se negativamente pela elevada temperatura operativa verificada no gabinete, que ultrapassa inclusive a categoria III de conforto térmico – atinge sensivelmente os 27.5°C. As restantes variantes têm perfis de temperatura operativa comparáveis entre si, com ocorrência de picos de temperatura entre os 26.0 e os 26.3°C.



A variante T1 (a azul escuro) com vidro triplo $g=52\%$ e dispositivo de protecção solar entre vidros não ultrapassa o limite de 26°C da categoria de conforto II, para o dia de verão VDI. Em comparação com a variante P1 que também possui o mesmo tipo de fachada, esta verifica um máximo de temperatura operativa ligeiramente superior (26.3°C) devido à menor potência de arrefecimento do piso radiante em comparação com o tecto radiante instalado na variante T1.

Nas horas de maior incidência de radiação solar na fachada sudeste (figura 11-I), a variante T2 de dispositivo de protecção solar interior apresenta valores de temperatura operativa ligeiramente superiores à T1, mesmo tendo em conta que possui mais 50% de área de tecto radiante. A potência de arrefecimento da variante T2 compensa o sobreaquecimento da zona durante este período do dia, algo que não é possível alcançar com o sistema de piso radiante de P2.

Por volta das 15 horas, com a diminuição da radiação solar incidente na fachada (figura 11-I), o dispositivo de protecção solar do gabinete é “recolhido” e verifica-se um aumento da temperatura já

próximo do fim do dia de trabalho, para as duas variantes de fachada envidraçada com $g=52\%$. Para a variante T2 de $g = 24\%$, a temperatura vai baixando para valores já dentro da categoria de conforto térmico I.

A figura 12-IV representa a frequência anual de temperaturas operativas elevadas para o mesmo gabinete, simulado com o ficheiro de ano climático típico. Tendo em conta a expressão dos resultados obtidos para o perfil de temperaturas da variante P2 verifica-se, como esperado, que esta variante ultrapassa largamente o critério recomendado para a ocorrência de temperaturas superiores a 26°C . A temperatura operativa do gabinete está fora do limite da categoria II durante 108 horas, muita acima das 24 horas de desvio aceitável correspondente a 5% de ocupação para a estação de arrefecimento. Para as restantes variantes a ocorrência de temperaturas superiores a 26°C é esporádica ao longo do ano.

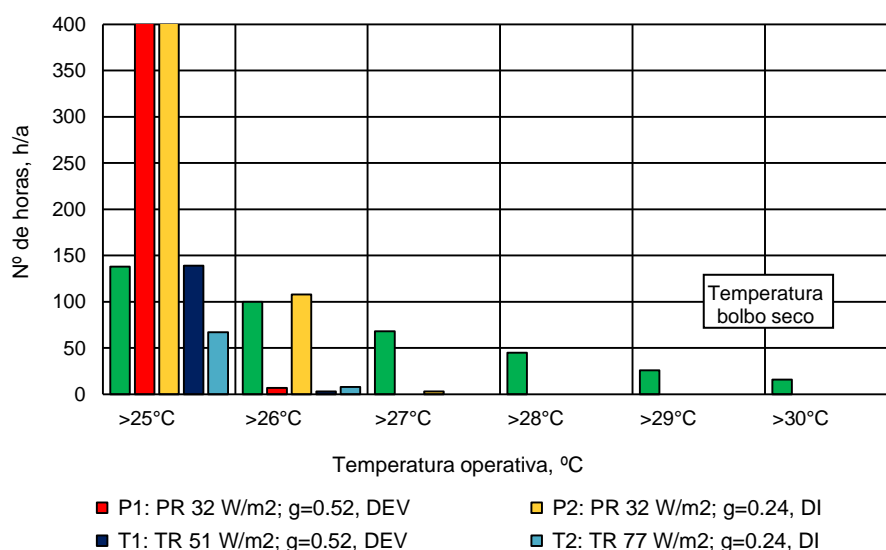


Fig. 12-IV – Frequência anual de temperaturas operativas elevadas para 5.02

A maior potência de arrefecimento da variante T2 permite a obtenção da menor frequência observável de temperaturas acima de 25°C . Contudo, a menor capacidade de controlo dos ganhos solares do dispositivo de sombreamento durante os picos de radiação solar incidente resulta numa ocorrência de temperaturas acima de 26°C ligeiramente superior à variante T1. Esta ocorrência é superior à verificada para T1 em apenas 5 horas, isto porque os dias de elevada radiação solar acontecem esporadicamente ao longo do ano climático típico.

A variante P1 revela o mesmo valor de frequência para temperaturas superiores a 26°C que T2. Contudo, observa-se uma elevado número de horas em que a temperatura operativa é superior a 25°C . Tal situação se deve à menor potência de arrefecimento do sistema de piso radiante.

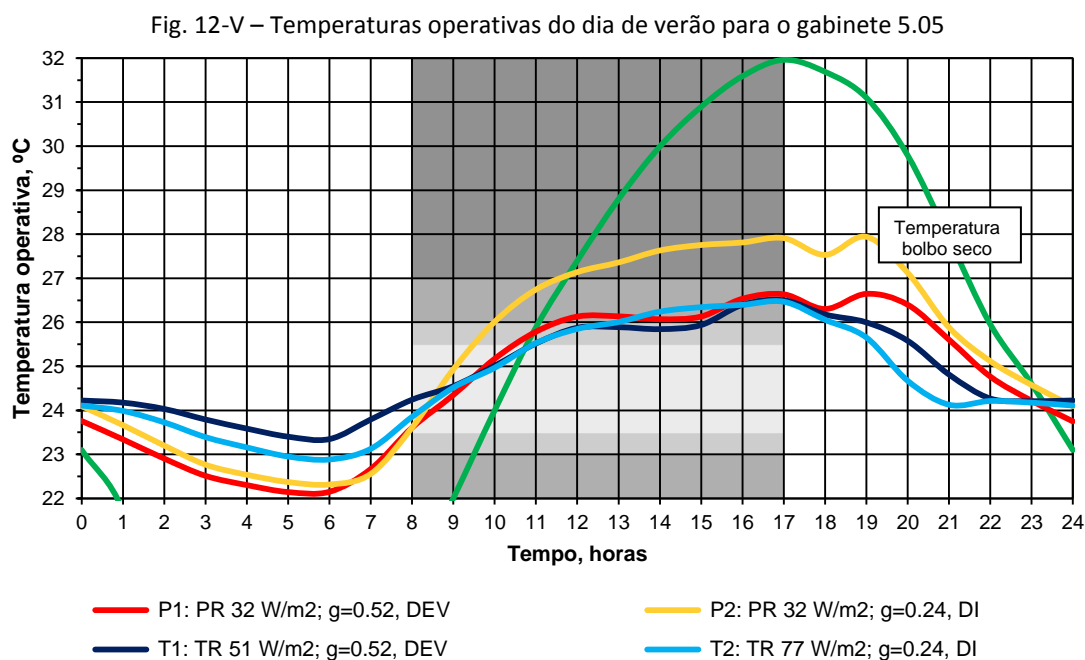
Gabinete 5.05

O perfil de temperatura operativa do gabinete administrativo individual é representada na figura 12-V.

A variante P2 (a amarelo) apresenta novamente um fraco desempenho térmico para o dia de verão com radiação solar intensa, atingindo uma temperatura máxima aproximada de 28°C. As outras variantes têm perfis de temperatura operativa comparáveis entre si.

Para as duas variantes com dispositivo de protecção solar de elevada eficiência, a temperatura operativa vai aumentando ao longo da manhã até estabilizar perto dos 26°C entre as 12 e 15 horas, tendo uma distribuição térmica semelhante à verificada para o gabinete 5.02. A partir das 15 horas, a temperatura aumenta, atingindo um máximo perto do fim do horário laboral (período de maior incidência de radiação solar na fachada sudoeste, ver figura 11-l) de 26.6°C e 26.5°C para a variante P1 e T1, respectivamente.

A variante T2 (a azul claro) tem uma distribuição térmica com valores semelhantes às variantes anteriores, sendo que a temperatura aumenta de forma contínua ao longo do dia, verificando-se também um pico de temperatura às 17h de aproximadamente 26.5°C.



Na figura seguinte são apresentados os resultados da frequência anual de temperaturas operativas elevadas para o gabinete 5.05. Também para este gabinete se verifica que o potencial do conceito P2 é bastante limitado; a ocorrência de temperaturas elevadas é muito superior ao limite de 24 horas definido, verificando-se inclusive uma frequência de temperaturas superiores a 27°C em 20 horas.

Para as restantes variantes a ocorrência de sobreaquecimento é semelhante e está dentro dos critérios máximos de desvio para a categoria de conforto térmico II. Contudo, o número de horas em que a temperatura está acima de 26°C neste gabinete é ligeiramente superior ao verificado para o gabinete administrativo 5.02 nas três variantes. A variante P1 tem a maior ocorrência de horas acima de 26°C, cerca de 16 horas.

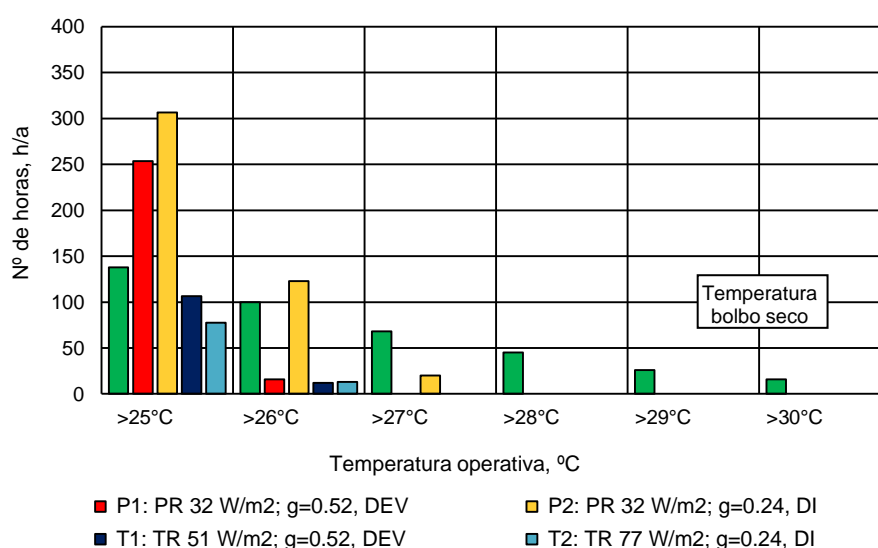


Fig. 12-VI – Frequência anual de temperaturas operativas elevadas para 5.05

Outras áreas de estudo

No ponto 5.1 dos anexos são apresentados os perfis de temperatura do dia de verão e os gráficos da frequência de temperaturas elevadas obtidos para a sala de reuniões e sala de conferências.

A variação da temperatura operativa obtida para cada compartimento durante o dia de verão é globalmente semelhante e equilibrada para todas as variantes. A exceção aplica-se, uma vez mais, à variante P2, especialmente na sala de reuniões, onde ocorre um máximo de temperatura operativa de 26.8°C.

Tendo em conta os resultados obtidos para o ano climático, verifica-se que raramente existe ocorrência de temperaturas operativas superiores a 26°C na sala de conferências e na de reuniões. As condições de conforto térmico anual para a variante P2 não se apresentam tão críticas neste espaço como nos gabinetes administrativos analisados anteriormente. Para a sala de reuniões, o número de horas em que

a temperatura é superior a 26°C é apenas de 19 horas, em comparação com as frequências superiores a 100 horas verificadas nos gabinetes, enquanto que para a sala de conferências não ocorrem temperaturas superiores a 26°C.

Temperaturas de inverno

No ponto 5.2 dos anexos são apresentadas as frequências anuais de temperaturas operativas abaixo de 21°C para as áreas seleccionadas, pese em conta que, para um estudo mais aprofundado da estação de aquecimento, se deveria preferencialmente seleccionar gabinetes unipessoais e bi-ocupados de menor cota. Os espaços não apresentam frequências de temperatura abaixo dos 21°C, à excepção do gabinete 5.05 onde há uma pequena ocorrência de temperaturas abaixo de 20°C. As características do gabinete, nomeadamente a elevada área de vãos envidraçados, contribuiu para a maior variação térmica do compartimento – elevadas perdas térmicas no inverno e elevados ganhos solares no verão.

Visão geral dos resultados de conforto térmico

Os resultados obtidos indicam que a variante de climatização P2 de sistema de piso radiante e fachada de vidro triplo com dispositivo de protecção solar interior encontra-se no limite do seu desempenho térmico. Esta situação verifica-se especialmente para os gabinetes administrativos individuais e bi-ocupados de cota superior. Tendo em conta que as frequências de temperaturas elevadas para o ano climático típico ultrapassam largamente o critério de aceitação definido, a variante P2 será desconsiderada na investigação do desempenho energético e económico das diferentes variantes.

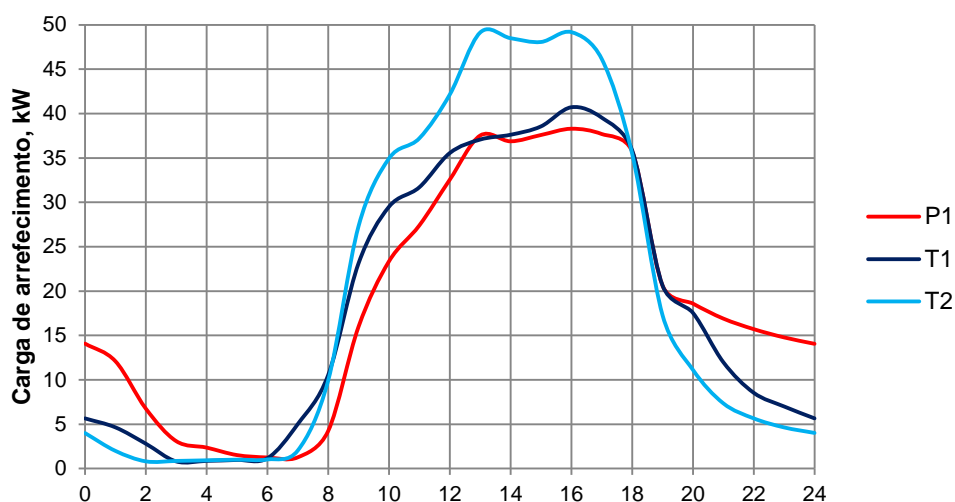
Da observação geral dos resultados de ocorrência de temperaturas elevadas ao longo do ano para os restantes conceitos definidos, verifica-se a obtenção de um elevado conforto térmico global para o edifício inteiro; uma ligeira ocorrência de temperaturas operativas superiores a 26°C é expectável apenas para os gabinetes administrativos individuais e bi-ocupados de cota superior.

Os resultados da simulação do modelo no ano climático típico revelam que também é atingido um elevado conforto térmico durante a estação de aquecimento para o edifício inteiro.

13. Perfis de carga de arrefecimento

Os perfis de carga térmica de arrefecimento foram obtidos por simulação do edifício inteiro nas mesmas condições implícitas de simulação usadas anteriormente. Na figura 13-I está representado o perfil de carga de arrefecimento obtido para as três variantes, considerando a totalidade das cargas térmicas internas definidas. A variante foi simulada para o dia de verão VDI de acordo com o definido pela directiva VDI 2078 para a determinação de cargas de arrefecimento.

Fig. 13-I – Perfis de carga de arrefecimento do edifício para o dia de verão VDI



Para as três variantes simuladas nas condições definidas, resultaram as seguintes cargas máximas de arrefecimento:

Tabela 13-I – Intervalos de temperatura operativa de cada categoria

Variante	Carga máxima de arrefecimento, kW
P1	38
T1	41
T2	49

O maior pico de carga é atingido no perfil de carga de refrigeração da variante T2, como seria expectável tendo em conta o pior desempenho do dispositivo de protecção solar interior para um dia de grande intensidade solar como o dia VDI. O pico de carga de 49 kW ocorre entre as 13h e as 16h. O perfil de carga da variante T1 tem uma distribuição semelhante, mas com um pico de carga menos acentuado. Para ambas as variantes a carga de arrefecimento desce rapidamente após o fim do horário de trabalho e já de madrugada a necessidade de se proceder ao arrefecimento de algum espaço do edifício é praticamente nula. Para a variante P1 verifica-se um aumento de carga menos pronunciado ao início do dia de trabalho, atingindo um pico de 38 kW ao fim da tarde. O período de arrefecimento nocturno dos espaços é mais prolongado; durante a noite a carga de arrefecimento desce lentamente para valores abaixo dos 15 kW.

14. Avaliação dos consumos energéticos

O consumo energético dos edifícios depende de forma significativa dos critérios usados para o ambiente interior – temperatura, ventilação e iluminação – e do *design* e operação dos edifícios, incluindo sistemas [1]. Para os critérios definidos e simulados anteriormente para a avaliação do conforto térmico, foi também definido como parâmetro de análise das variantes a simulação do modelo do edifício inteiro durante o ano climático típico para investigação dos consumos energéticos associados a cada variante.

Nas simulações de consumo energético, para obtenção de resultados realistas, foram consideradas 80% do total das cargas térmicas de ocupação, iluminação e equipamento definidas para os compartimentos do edifício, de forma a contabilizar situações como o horário de almoço, período de férias, ausência por doença, entre outros. Para a sala de reuniões e sala de conferências foram consideradas apenas 50% do total das cargas térmicas internas descritas para estes dois espaços.

Para o cálculo dos consumos específicos, é considerada a área de referência de 923 m² para o edifício, como indicado pela empresa de arquitectura.

14.1 Energia final

Na avaliação do desempenho energético foram determinados, por simulação do modelo, os consumos energéticos totais de aquecimento e arrefecimento do edifício, resultantes do aquecimento ou arrefecimento da zona pela superfície radiante e do ar de insuflação pela UTA. O consumo eléctrico para iluminação, assim como o consumo eléctrico associado aos ventiladores do sistema de ventilação e às bombas circuladoras de água quente e fria também foram obtidos.

Para os 3 conceitos simulados é apresentada a energia final para aquecimento, arrefecimento e electricidade do edifício inteiro ao longo do ano climático típico. Os valores de energia final obtidos por simulação são apresentados no ponto 8 dos anexos, a folha de cálculo no ponto 9.1 dos anexos.

Aquecimento

Os resultados obtidos para os consumos específicos de aquecimento do edifício ao longo do ano estão representados na figura 14-I.

Como esperado, as variantes com a solução de fachada do conceito original de vidro triplo de isolamento térmico ($g = 52\%$) apresentam um menor consumo energético para aquecimento, pois têm um maior aproveitamento dos ganhos solares para aquecimento útil dos compartimentos na estação de aquecimento. A variante de conceito base tem um consumo específico anual de 51 kWh/m²/ano.

A variante T2 de fachada de vidro triplo de controlo solar com $g = 24\%$ é a alternativa que implica maior consumo específico de energia para aquecimento. A redução da quantidade de energia solar transmitida pela fachada transparente e consequente redução do aquecimento útil dos compartimentos na estação

de inverno resulta num consumo de cerca de 56 kWh/m²/ano, um acréscimo de 9% em relação à variante do conceito base P1.

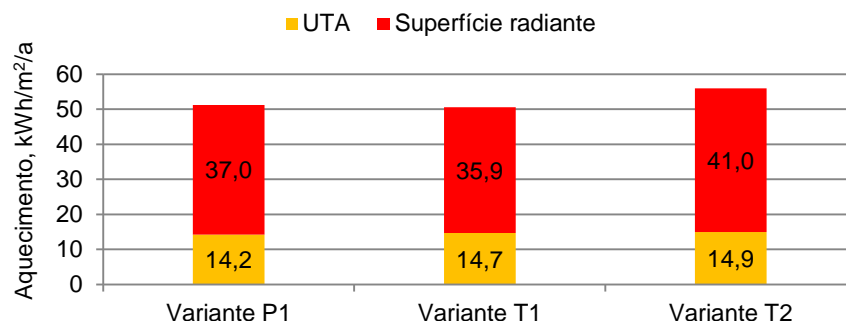


Fig. 14-I – Consumo específico anual para aquecimento

Arrefecimento

Os consumos específicos finais anuais de arrefecimento para o edifício são apresentados na figura 14-II. Para as variantes P1 e T1 verifica-se um consumo de energia para arrefecimento muito semelhante, cerca de 20 kWh/m² para o ano climático típico.

A variante T2 apresenta um consumo para arrefecimento de cerca de 16 kWh/m²/ano, uma redução de 20% em relação ao consumo para a variante P1. Nesta variante existe um maior consumo de energia final para arrefecimento durante os dias de pico de verão com radiação solar intensa, devido à menor eficácia do dispositivo de protecção solar interior no controlo de ganhos solares. Mas, tendo em conta que estes dias acontecem com uma frequência anual baixa (ver figura dos dados climáticos anuais em anexo, 1-II), o menor factor dos ganhos solares dos vãos envidraçados de controlo solar contribuiu para a redução do consumo específico para arrefecimento ao longo do ano.

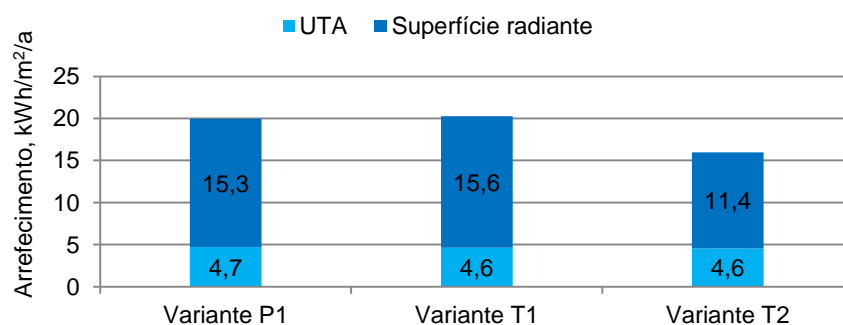


Fig. 14-II – Consumo específico anual para arrefecimento

Electricidade

Na figura 14-III está representado o consumo eléctrico específico anual para cada variante simulada.

O consumo eléctrico específico para os ventiladores é constante às três variantes, aproximadamente 13 kWh/m²/ano. O consumo eléctrico associado às bombas circuladoras é menor que 1 kWh/m²/ano para as 3 variantes.

A variação dos consumos eléctricos referentes à iluminação artificial está associada às propriedades físicas dos vãos envidraçados. As variantes P1 e T1 têm o mesmo consumo eléctrico para iluminação, aproximadamente 11 kWh/m²/ano, visto que exibem a mesma solução de fachada.

Como esperado, a variante T2 implica um maior consumo específico anual para iluminação, devido ao facto da fachada envidraçada de controlo solar permitir uma menor passagem de radiação na gama do visível, havendo maior necessidade de activação da iluminação artificial. Tendo em conta a elevada área de vãos envidraçados do edifício bancário, existe uma boa exposição solar para os dois tipos de fachada – o conceito de fachada T2 traduz-se num aumento de consumo eléctrico aproximado de “apenas” 3 kWh/m²/ano.

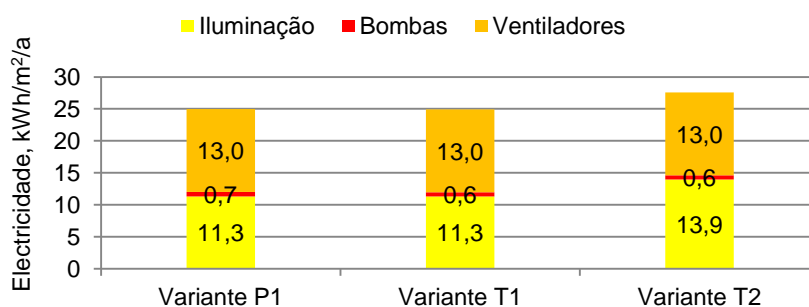


Fig. 14-III – Consumo eléctrico específico anual

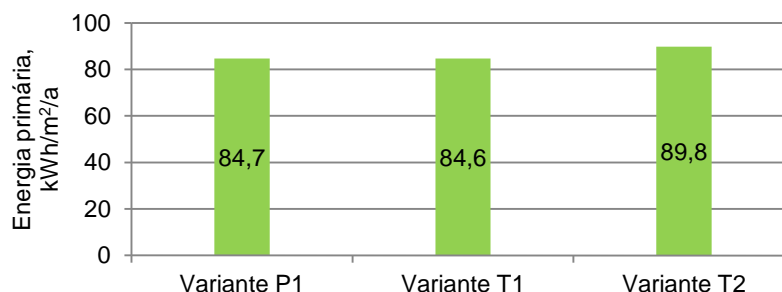
14.2 Energia primária

A demanda de energia primária foi calculada tendo em conta os factores de energia primária referenciados pelo IPTG; o factor de energia primária para arrefecimento é obtido do factor de electricidade e considerando o COP de 4,5 do chiller de compressão.

Aquecimento	$f_p = 0.16$
Electricidade	$f_p = 2.60$
Arrefecimento	$f_p = 0.58$

Na figura 14-IV está representada a demanda de energia primária total do edifício para cada conceito de climatização. A demanda de energia primária para as variantes P1 e T1 é muito semelhante, na ordem dos 85 kWh/m²/ano, resultando de consumos energéticos e eléctricos também idênticos. A variante T2 apresenta o pior resultado em termos de sustentabilidade energética. A maior demanda de energia primária resulta principalmente dos maiores consumos eléctricos para iluminação.

Fig. 14-IV – Demanda de energia primária



Visão geral dos resultados de consumo energético

Os consumos energéticos específicos anuais obtidos por simulação para as variantes P1 e T1 são semelhantes. A escolha da fachada definida para estas variantes revela-se energeticamente favorável quando comparado com a fachada de controlo solar. A excepção verifica-se para a situação em foco neste estudo, a estação de arrefecimento. Um maior consumo de energia para arrefecimento é espectável, mesmo tendo em conta a utilização do dispositivo de protecção solar optimizado.

A variante T2 tem o desempenho menos ecológico dos três conceitos definidos. A maior demanda de energia primária para a variante T2 resulta principalmente dos maiores consumos eléctricos para iluminação, mas também dos maiores consumos de energia para aquecimento, ambos devido às propriedades físicas da fachada envidraçada de controlo solar.

15. Análise de rentabilidade económica

Para a avaliação da variante de climatização mais rentável foi realizada uma análise económica com base no Valor Actual Líquido (VAL), tendo em conta os consumos energéticos obtidos por simulação e os investimentos necessários em cada variante.

15.1 Custos de investimento

Para a quantificação dos investimentos a efectuar em cada conceito, foram consideradas as variáveis relevantes para o estudo: fachada envidraçada, superfície activa para aquecimento e arrefecimento, piso elevado, painel de atenuação acústica, produção de frio, geração de calor e ventilação e ar condicionado. Os custos específicos destes parâmetros estão listados em anexo, no ponto 7.

Os custos de investimento de cada variante estão representados na figura 15-I, os cálculos efectuados são apresentados no ponto 9.2 dos anexos. Para a variante P1 de piso elevado com sistema de piso radiante, o custo definido como “superfície radiante” corresponde ao custo total da estrutura de piso elevado com sistema de piso radiante ClimaLevel; os custos não foram dissociados e não é apresentado nenhum custo particular para a estrutura de piso elevado nesta variante. A mesma tem definido o parâmetro do custo de investimento dos painéis acústicos, custo que não existe para as variantes com painéis radiantes de tecto para aquecimento e arrefecimento.

Para os parâmetros analisados neste estudo económico, a variante original quantifica um investimento na ordem dos 563 mil €.

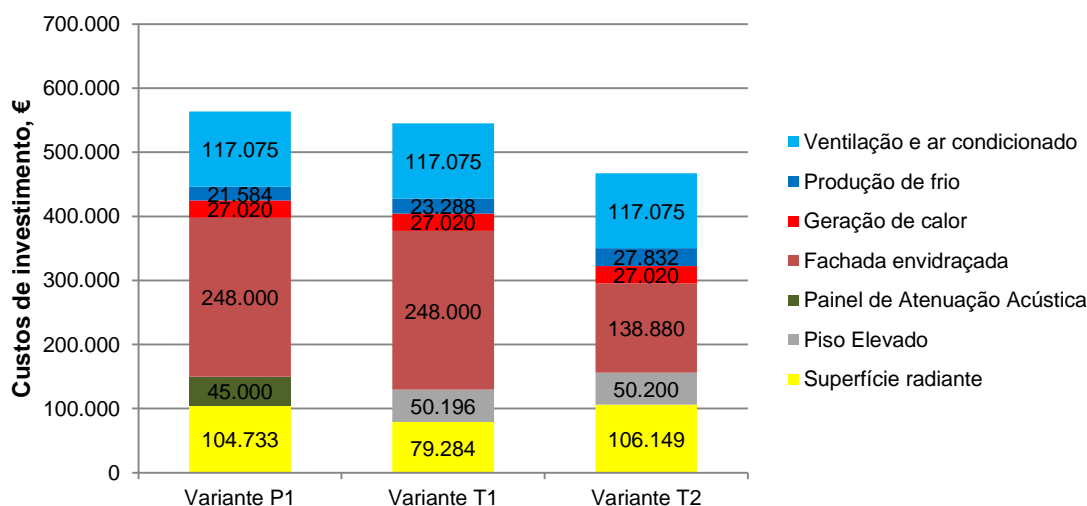


Fig. 15-I – Custos de investimento das 3 variantes

O conceito de climatização T2 destaca-se como a variante com os menores custos de investimento associados, traduzindo-se numa poupança de investimento de 96 mil € em relação à variante original, ou seja, cerca de 17%. Este resultado deve-se sobretudo ao menor investimento na solução de fachada

envidraçada considerada nesta variante. Por outro lado, como esta fachada de menor custo requer uma maior área de tecto radiante para manter as condições de conforto térmico, é necessário um maior investimento para a variável “superfície radiante”, quando comparada com a variante T1.

O investimento no piso ClimaLevel (que incorpora os custos de piso elevado) é menor que o investimento resultante da soma do custo de tecto radiante e piso elevado para a variante T1. Contudo, o investimento total para a variante T1 é menor devido ao facto do tecto radiante evitar a necessidade de instalação de um painel de atenuação acústica. Este aspecto também contribui para a diminuição de custo de investimento da variante T2 comparativamente ao valor de investimento base do conceito original.

15.2 Custos operacionais

A partir dos consumos energéticos obtidos por simulação e com base nos preços específicos de energia listados em anexo (ponto 6) foram calculados os custos energéticos para os três conceitos de climatização. Na figura 15-II são apresentados os custos específicos anuais de energia de cada variante.

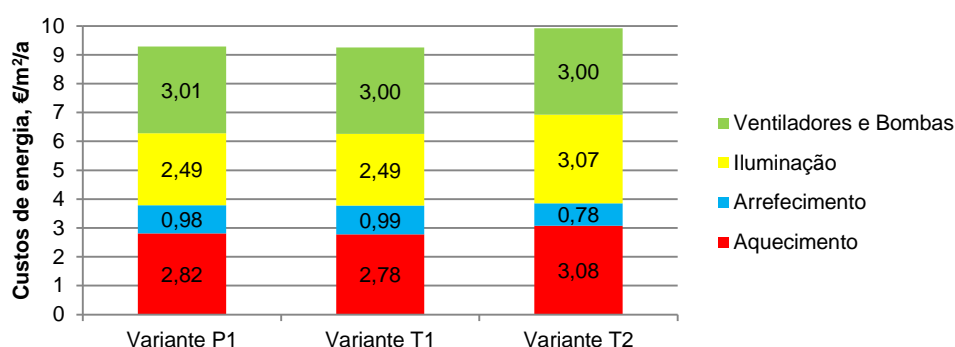
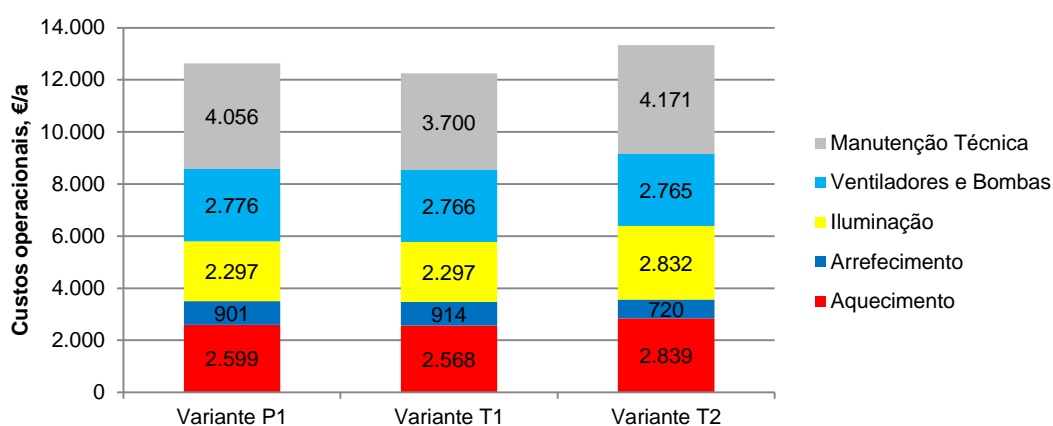


Fig. 15-II – Custos energéticos específicos anuais das três variantes

O custo anual específico de energia situa-se abaixo dos 10 €/m²/ano. As variantes de fachada de vidro triplo de isolamento térmico exibem um custo específico energético anual muito semelhante, na ordem dos 9.1 €/m²/a. Os maiores custos específicos energéticos são referentes à variante T2, visto que, como se verificou anteriormente, a escolha da fachada de controlo solar g=24% mostra-se energeticamente desfavorável.

Os custos operacionais para cada variante são obtidos a partir dos custos energéticos e dos custos de manutenção periódica e reparação técnica de equipamentos e instalações. Para o cálculo destes custos foi definida uma taxa-fixa de despesa anual correspondente a 1.5% do custo de investimento para cada variante. Os custos operacionais das fachadas envidraçadas não foram considerados por impossibilidade de declarar uma despesa associada. Os custos operacionais anuais são apresentados na figura seguinte.

Fig. 15-III – Custos operacionais anuais das três variantes



Os custos anuais de operação estão abaixo dos 14 mil €, para os três conceitos. A variante T2 tem os maiores custos operacionais associados, 13.3 mil € por ano, um acréscimo de 6% em relação à variante base com custos de operação de 12.6 mil € por ano.

15.3 Método do valor actual líquido

Para avaliação das variantes simuladas em termos de rentabilidade económica foi definido um estudo económico realizado de acordo com o método do Valor Actual Líquido (VAL), considerando os custos de investimento e de operação calculados anteriormente. O VAL é um indicador utilizado na análise da rentabilidade de projectos de investimento considerando a inflação e os juros do capital. À excepção do parâmetro da vida útil, os valores considerados para as condições-base correspondem aos valores reconhecidos para o cálculo de certificação alemã de sustentabilidade, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB):

Inflação	2%
Aumento do preço da energia	4%
Juros sobre o capital	5.5%
Vida útil	25 anos

Na figura seguinte é apresentado o indicador VAL para as 3 variantes, assim como o custo total anual. A variante original é a variante com o pior desempenho económico. A variante T2 apresenta a maior rentabilidade económica, com um VAL de 727 mil €, uma redução de 17% dos custos em relação à variante base. O custo total anual da variante T2, considerando os custos energéticos anuais e de manutenção e pagamento de juros, não chega aos 55 mil €/ano. A variante T1 representa uma ligeira redução de 3% do valor actual líquido da variante base.

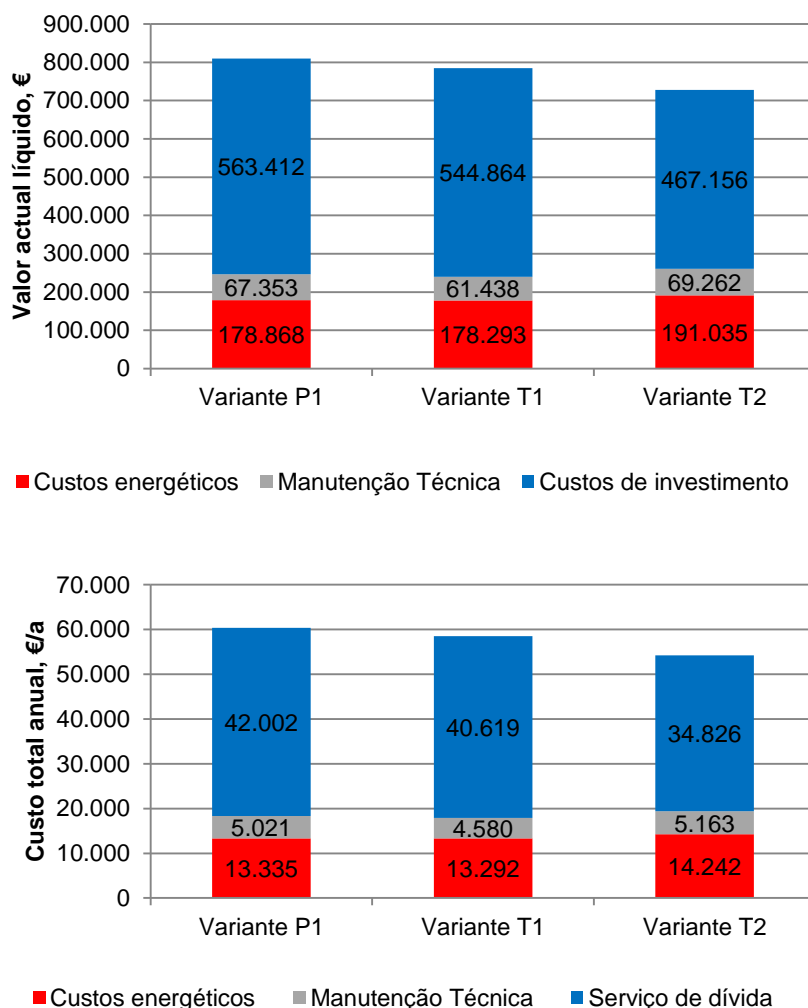


Fig. 15-IV – Valor actual líquido e custo total anual

16. Conclusões

No estudo das condições de conforto térmico verifica-se que a variante P2 definida pelo sistema de piso radiante e fachada de vidro triplo de controlo solar com dispositivo de protecção solar interior tem um fraco desempenho térmico, obtendo-se, para alguns compartimentos do edifício, condições de temperatura operativa muito para além dos limites de conforto térmico aceitáveis durante a estação de arrefecimento.

As restantes variantes demonstraram um bom desempenho térmico. Verificou-se que está assegurada a obtenção de um elevado conforto térmico anual para o edifício inteiro com uma pequena ocorrência de temperaturas operativas de verão acima da categoria de conforto para os gabinetes de maior cota.

Tendo em conta que os resultados das condições de conforto térmico denotam uma elevada frequência de temperaturas operativas no intervalo entre os 25°C e 26°C para a variante P1 com piso radiante, as variantes de tecto radiante evidenciam-se como as opções mais interessantes.

Para dias de grande intensidade solar, a variante T2 de dispositivo de protecção solar interior apresenta um sobreaquecimento de alguns compartimentos ligeiramente superior ao verificado para a variante T1. Tendo em conta esta desvantagem, para uma tomada de decisão puramente baseada no critério de conforto térmico, a variante T1 distingue-se como a escolha mais acertada.

No estudo do consumo de energia, as variantes P1 e T1 tem o melhor desempenho energético, com maior aproveitamento de iluminação natural e dos ganhos solares para aquecimento útil durante a estação de aquecimento. A variante T2 destaca-se como a variante com pior desempenho energético devido às características físicas da fachada envidraçada que implicam um maior consumo energético para aquecimento e um maior consumo eléctrico para iluminação. Tendo em conta estes resultados, esta variante é a escolha menos ecológica em termos de demanda de energia primária.

Na análise económica, os resultados demonstram que a variante T2 é o conceito mais económico. Apesar dos maiores custos energéticos associados, a variante T2 implica um menor custo de investimento, o que se traduz numa maior rentabilidade económica, após avaliação pelo método do VAL.

Analizando as variantes numa visão geral que engloba os vários critérios de avaliação definidos, as variantes T1 e T2 destacam-se como as escolhas mais interessantes para o projecto do edifício, revelando um potencial de optimização do conforto térmico face à variante base P1. A variante T1 tem o melhor desempenho térmico, energético e ecológico. A variante T2, com a escolha do construtor de utilização de um dispositivo de protecção solar convencional, tem um desempenho económico consideravelmente superior, mantendo um elevado conforto térmico, mas apresentando resultados ligeiramente inferiores ao nível de sustentabilidade energética. A escolha final é, em última instância, uma decisão que cabe ao construtor, tendo em conta os seus interesses e a ponderação que faz dos diferentes critérios avaliados.

17. Referências

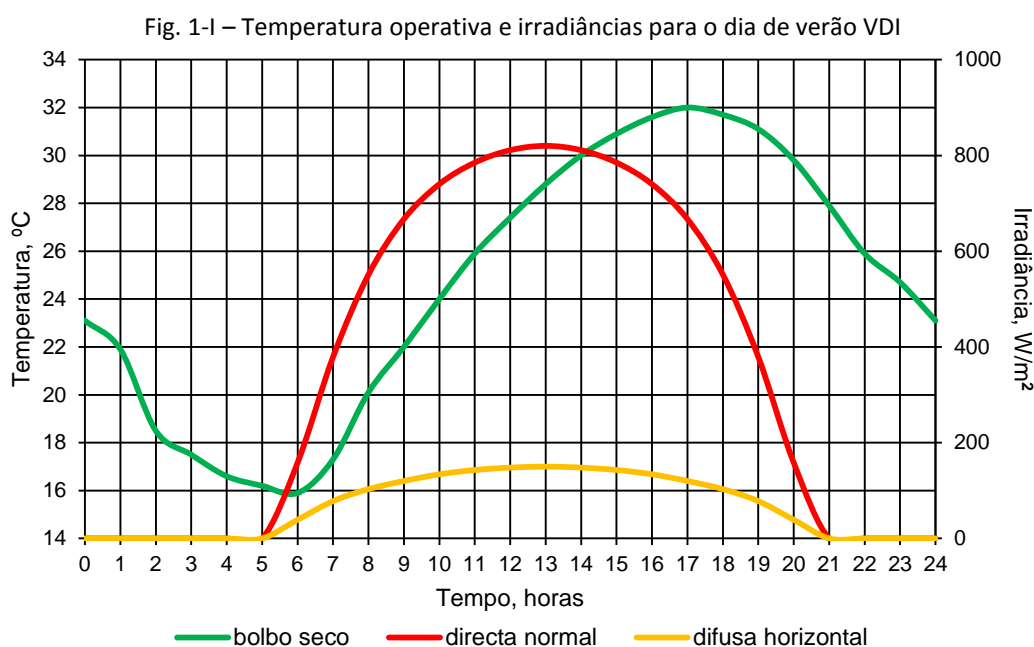
- [1] European Standard EN 15251, 2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, European Committee for Standardization.
- [2] International Standard ISO 7730, 2005, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, International Organization for Standardization.
- [3] IDA Indoor Climate and Energy: Getting Started, version 4.5, EQUA Simulation AB, February 2013
- [4] Sahlin, P., Bring, A., IDA Solver: a tool for Building and Energy Systems Simulation (http://www.ibpsa.org/proceedings/BS1991/BS91_339_348.pdf)
- [5] Kalamees, T., IDA ICE: the simulation tool for making the whole building energy and HAM analysis. May 2004
- [6] Björnsell, N., Bring, A., Eriksson, L., Grozman, P., Lindgren, M., Sahlin, P., Shapovalov, A., Vuolle, M., IDA Indoor Climate and Energy. Proceedings of the IBPSA Building Simulation '99 conference, Kyoto, Japan. 1999
- [7] Vuolle, M., Bring, A., Sahlin, P., An NMF Based Model Library for Building Thermal Simulation. Proceedings of the IBPSA Building Simulation '99 conference, Kyoto, Japan. 1999
- [8] Bring, A., Sahlin, P., Vuolle, M., Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation. A Report of Task 22, Building Energy Analysis Tools. Version 1.02, Royal Institute of Technology in Stockholm. 1999
- [9] IDA Indoor Climate and Energy: User Manual, version 4.5, EQUA Simulation AB, February 2013
- [10] Kropf, S., Zweifel, G., Validation of the Building Simulation Program IDA-ICE According to CEN 13791, Thermal Performance of Buildings – Calculation of Internal Temperatures of a Room in Summer Without Mechanical Cooling – General Criteria and Validation Procedures, HTA LUZERN/ZIG.
- [11] Equa Simulation AB, Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 build with respect to ANSI/ASHRAE Standard 140-2004, April 2010.
- [12] Equa Simulation AB, Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 with respect to CEN Standard EN 15255-2007 and EN 15265-2007, May 2010.

1. Dados climáticos

Para o estudo do desempenho térmico e respectivos consumos energéticos das diferentes variantes simuladas foram utilizados dois ficheiros de dados climáticos que incluem valores horários de condições meteorológicas relevantes, nomeadamente a temperatura de bolbo seco e a humidade relativa do ar exterior, a irradiância directa normal e a difusa horizontal, a velocidade e direcção do vento.

1.1 Dia de verão VDI

Para o estudo do conforto térmico foi utilizado um ficheiro climático definido através da directiva alemã VDI 2078. A directiva VDI 2078 (Verein Deutscher Ingenieure) define dados meteorológicos para simular um dado período prolongado e pronunciado de verão de forma a determinar as cargas de arrefecimento, temperaturas do ar interior e temperaturas operativas para uma zona térmica. Foi definido um dia quente e húmido com elevada radiação solar e na ausência de vento. Foi considerada uma razão de humidade de 12 g/kg de ar seco, condição relevante para a carga latente. O perfil da temperatura ambiente está especificado na figura 1-I, assim como as irradiâncias para o dia de Julho definido.



1.2 Ano climático típico

O ficheiro climático empregue no cálculo da ocorrência anual de temperaturas elevadas e do consumo energético do edifício é um ano climático típico definido pela ISO Test Reference Year. Segundo a classificação de regiões do Test Reference Year para a Alemanha, a cidade onde o banco será construído pertence à região TRY 6, estação meteorológica de Bad Marienburg. O ano climático típico resulta de um conjunto de 20 anos de dados meteorológicos horários registados entre 1988 e 2007.

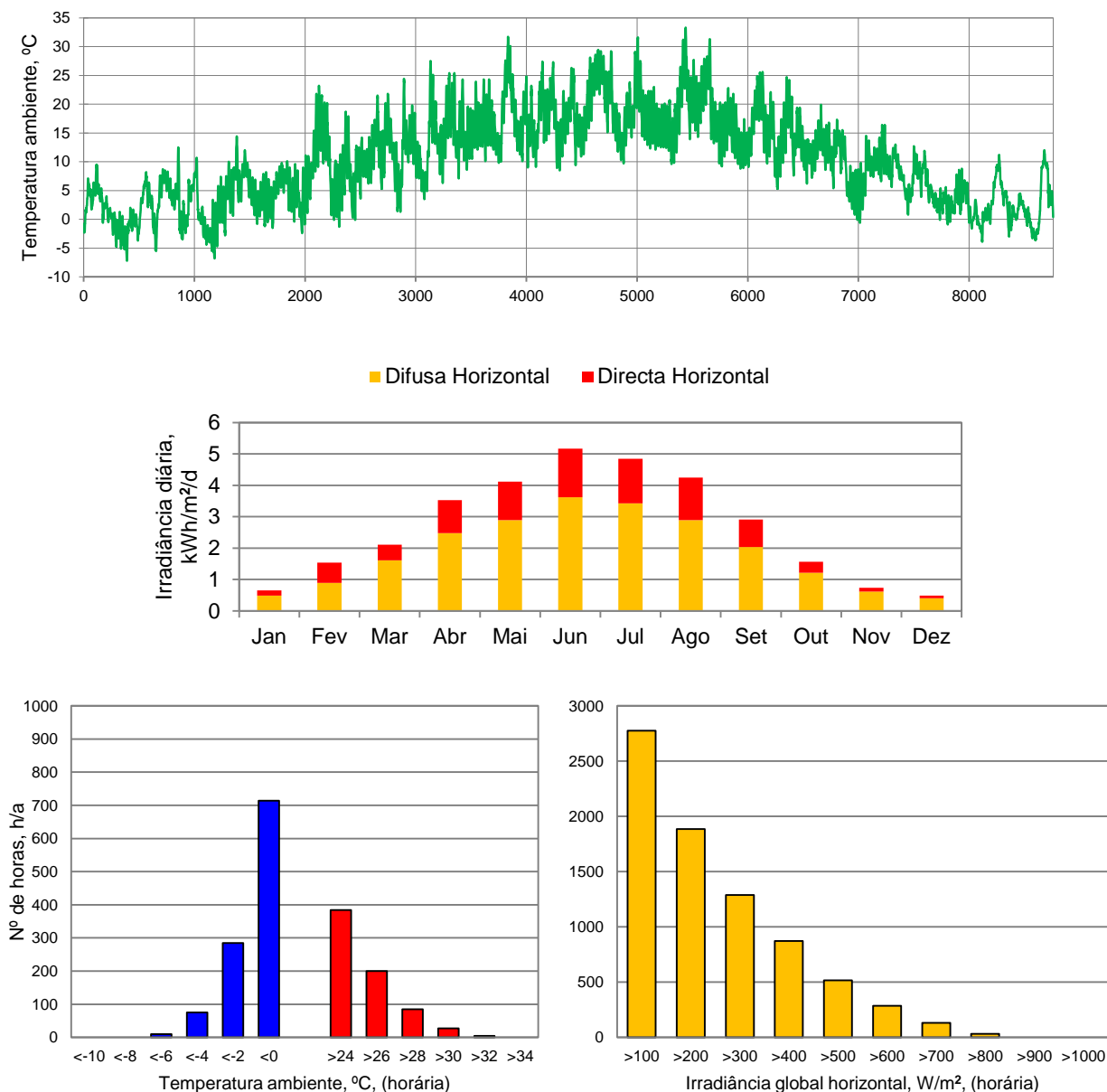


Fig. 1-II – Representações da temperatura e radiação para o ano climático típico

2. Considerações de simulação

Dispositivo de protecção solar

Para o controlo dos ganhos solares foi definido nas simulações que o dispositivo de protecção solar de cada compartimento é activado quando a irradiância global incidente na envolvente envidraçada do compartimento é superior a 200 W/m^2 . Foi também considerado a existência de um controlo automático para activação do dispositivo em períodos de não ocupação dos compartimentos, para evitar o sobreaquecimento dos mesmos.

Activação da luz artificial

A necessidade de recorrer à iluminação instalada depende da disponibilidade de luz natural. Foi considerado nas simulações que a iluminação artificial nos compartimentos é activada quando, durante o horário de trabalho, a iluminância for inferior a 500 lux. Se a luz natural disponível é menor que o valor mínimo definido na simulação, 100 lux, a luz artificial é activada na potência nominal. Entre estes limites, o controlo é proporcional.

Horário laboral

O horário laboral previsto e simulado para o trabalhador típico do banco é das 8h às 17h, dias úteis. Para a sala de reuniões e a sala de conferências, foi definido uma ocupação diária de 5 horas dividida em 3 intervalos, das 8h às 10h, 12h às 13h30 e 15h às 17h.

Vestuário de trabalho

Pela norma EN ISO 7730, o vestuário definido para o ocupante típico do edifício consiste em roupa interior de manga curta, camisa, calças, casaco, meias e sapatos, correspondente a um isolamento térmico de $I_{cl} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 1 \text{ clo}$. Tendo em conta o conforto térmico do usuário, foi considerado na simulação uma variação sazonal de $\pm 0.25 \text{ clo}$ no valor de isolamento térmico para a roupa utilizada ao longo do ano. O vestuário de cada ocupante varia entre estes limites através dum controlo proporcional para adaptação de vestuário do ocupante e obtenção do conforto.

Nível de actividade metabólica

A partir da norma ISO 7730, definiu-se o valor de taxa metabólica correspondente aos níveis de actividade sedentária de escritório, $M = 70 \text{ W/m}^2 = 1.2 \text{ met}$.

3. Fontes internas de calor

As fontes internas de calor resultantes de ocupação, iluminação artificial e equipamento são descritas de seguida, tendo em conta os valores descritos nos planos do projecto.

Densidade ocupacional

Foi considerada a seguinte ocupação para os diferentes tipos de compartimentos:

- 1 – Gabinetes de consultoria: 1 trabalhador e 1 cliente
- 2 – Gabinetes administrativos: 2 trabalhadores; excepções: gabinetes do “canto” com 1 ocupante; gabinetes administrativos de 4 ocupantes
- 3 – Sala de reuniões: 10
- 4 – Sala de conferências: 19
- 5 – Foyer: 5 pessoas presentes em média
- 6 – Sala de espera: 4 pessoas presentes em média
- 7 – Corredores: 1 pessoas por 10 m², em média

Iluminação

As seguintes potências específicas máximas de iluminação para as diferentes divisões foram definidas pelo Ingenieur Partnerschaft Technische Gebäudeausrüstung (IPTG):

- 1 – Gabinetes de consultoria: 17 W/m²
- 2 – Gabinetes administrativos: 17 W/m²
- 3 – Sala de reuniões: 18 W/m²
- 4 – Sala de conferências: 18 W/m²
- 5 – Foyer: 18 W/m²
- 6 – Sala de espera: 18 W/m²
- 7 – Corredores: 15 W/m²

Equipamento

Os principais equipamentos de escritório definidos no modelo computacional têm a seguinte distribuição:

- 1 – Gabinetes de consultoria: 1 computador, 1 monitor e 1 impressora por gabinete
- 2 – Gabinetes administrativos: 1 computador e 2 monitores por posto de trabalho, 1 impressora por gabinete
- 3 – Sala de reuniões: 1 projector e 1 computador
- 4 – Sala de conferências: 1 projector e 1 computador
- 5 – Foyer: 4 computadores, 5 monitores, 1 impressora
- 6 – Sala de espera: 1 PC, 1 monitor e 1 impressora

Foram consideradas as seguintes cargas térmicas para a operação desses dispositivos:

PC – 90 W

Monitor – 30 W

Impressora – 30 W

Projector da sala de reuniões – 400 W

Projector da sala de conferências – 800 W

4. Características do modelo

A instalação foi simulada com as características descritas neste ponto. A geração de calor é efectuada pelo sistema de aquecimento urbano, simulado como uma caldeira com 100% de eficiência. A produção de água fria é assegurada por um chiller de compressão com $COP = 4,5$. A distribuição de água até ao equipamento de climatização é efectuada por intermédio de bombas circuladoras. A eficiência da distribuição considerada para o sistema foi 0,95.

4.1 Operação de aquecimento e arrefecimento

A operação de aquecimento da zona inicia-se quando a temperatura do ar interior é inferior a 20°C, através da definição de um termostato com set-point de 21°C e dead-band de 2°C. A temperatura de fornecimento de água para aquecimento foi definida em função da temperatura ambiente, como apresentado na figura seguinte.

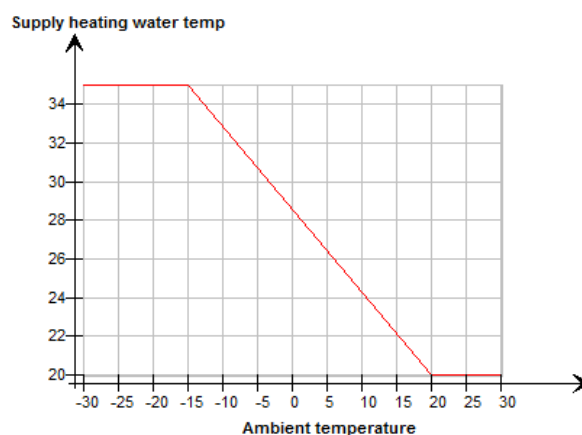


Fig. 4-I – Temperatura da fornecimento de água para aquecimento

A operação de arrefecimento começa quando a temperatura do ar interior está acima de 25°C. Para evitar a ocorrência de condensação na superfície activa (piso ou tecto radiante) a temperatura de entrada de água foi regulada. Foi simulado um controlo que mantém a temperatura de entrada da água pelo menos 1°C acima da temperatura de ponto de orvalho.

4.2 Ventilação Mecânica

O sistema de ventilação é modelado como um sistema CAV (constant air volume) com caudais de ar de insuflação constante para ventilação higiénica. Nas condições de simulação consideradas, a operação de ventilação mecânica é efectuada de forma contínua entre as 7:00 e as 18:00 h de cada dia útil; o ar insuflado tem uma temperatura constante anual de 20°C.

Os caudais de ventilação mecânica das zonas foram baseados nos planos do IPTG. Os respectivos valores de caudal para os diferentes tipos de divisão são:

- 1 – Gabinetes de consultoria: 45 m³/h/ocupante
- 2 – Gabinetes administrativos: 45 m³/h/ocupante; excepto gabinetes do “canto” com 150 m³/h
- 3 – Sala de reuniões: 450 m³/h
- 4 – Sala de conferências: 1050 m³/h
- 5 – Foyer: 530 m³/h
- 6 – Sala de Espera: 270 m³/h

A unidade de tratamento de ar (UTA) considerada tem os seguintes componentes: baterias de aquecimento e de arrefecimento, ventiladores de insuflação e extracção e recuperador de calor; é feita recuperação térmica do ar de extracção. Para além do tratamento térmico, foi assumido que não ocorre humificação ou desumificação do ar insuflado.

Caudal de ar	7805 m ³ /h
Eficiência de insuflação	0.77
Perda de carga total de insuflação	880 Pa
SPF	1.14 kW/(m ³ /s)
Eficiência de extracção	0.78
Perda de carga total de extracção	670 Pa
SPF	0.86 kW/(m ³ /s)
Eficiência do recuperador de calor	0.71

4.3 Equipamento de climatização

O sistema de piso activo ClimaLevel simulado apresenta as seguintes características:

Diâmetro exterior do tubo	20 mm
Espaçamento entre tubos	150 mm
Profundidade de localização	30 mm
Fluxo de água	10 kg/h/m ²
Superfície activa da área de pavimento	90%
Perda de carga total	7 mWS
Rendimento da bomba	0.3
Potência máxima de arrefecimento ($\Delta T = 3$ K, água):	35 W/ m ²
Potência máxima de aquecimento ($\Delta T = 3$ K, água):	35 W/ m ²

O tecto radiante foi simulado com as seguintes características:

Potência máxima de arrefecimento ($\Delta T = 10$ K, água-ar):	128 W/m ²
Potência máxima de aquecimento ($\Delta T = 15$ K, água-ar):	140 W/m ²
Perda de carga total	7 mWS
Rendimento da bomba	0.3

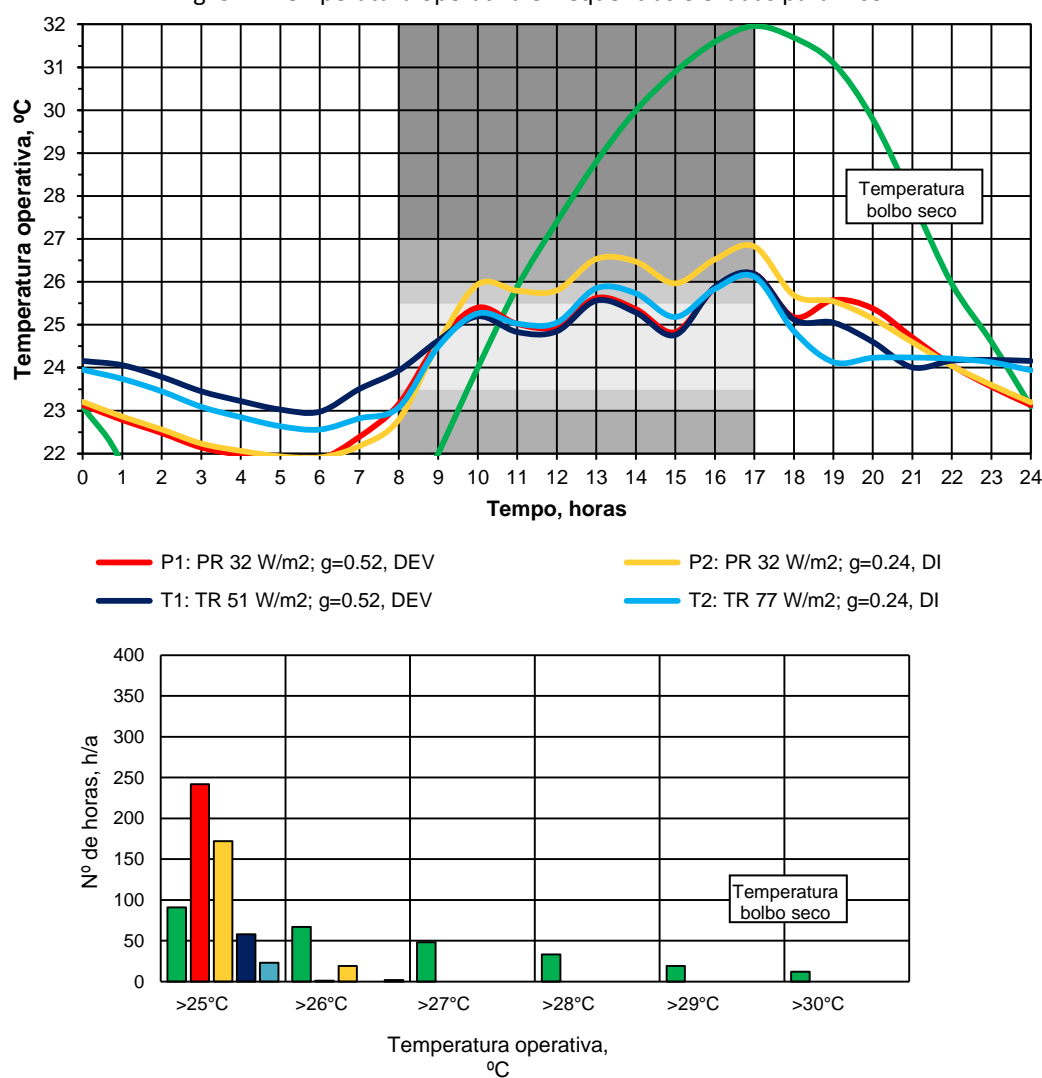
5. Resultados da avaliação do conforto térmico

5.1 Outras áreas de estudo

Nas figuras seguintes são apresentadas os perfis de temperatura e frequências anuais obtidos para as outras áreas especificadas para o estudo desempenho térmico: sala de reuniões e sala de conferências.

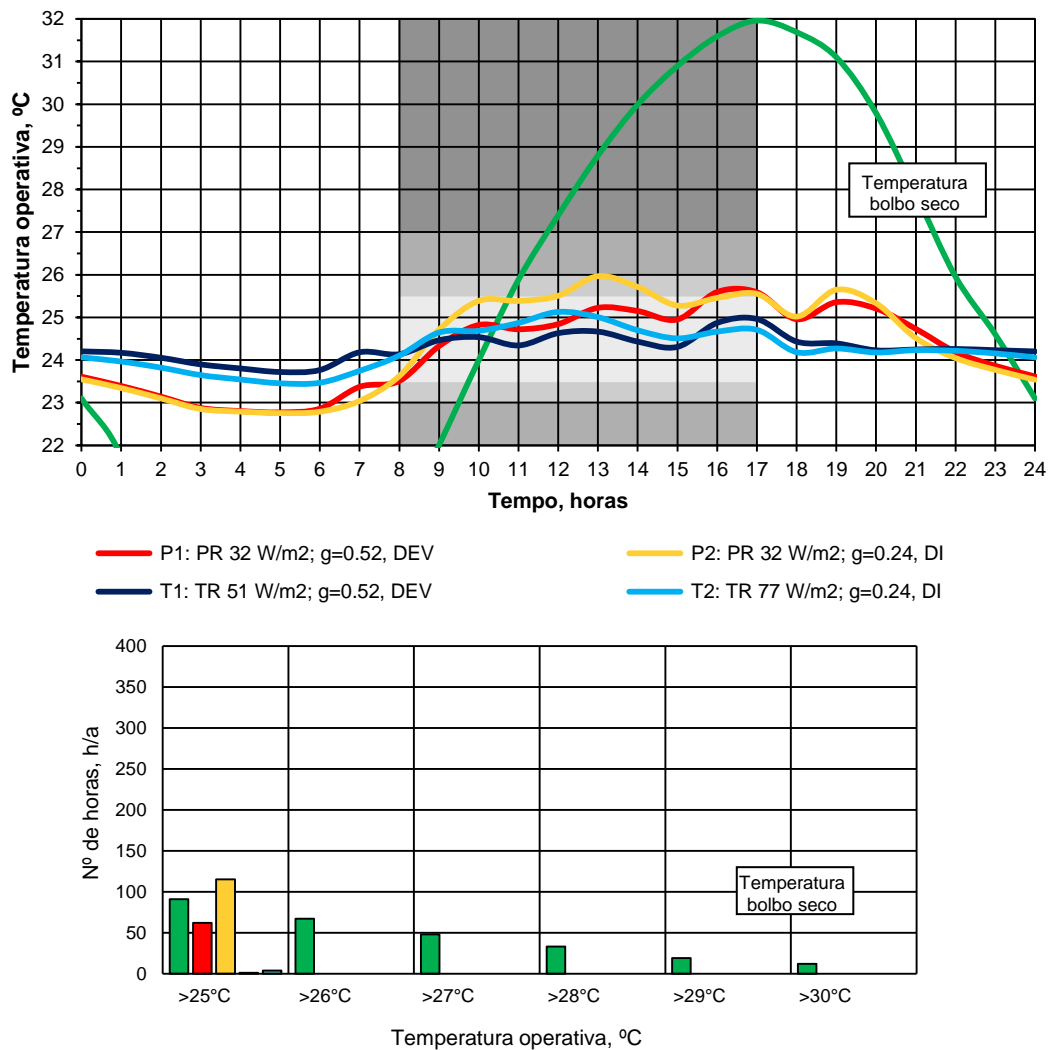
Sala de reuniões 2.05

Fig. 5-I – Temperatura operativa e frequências elevadas para 2.05



Sala de conferências 6.01

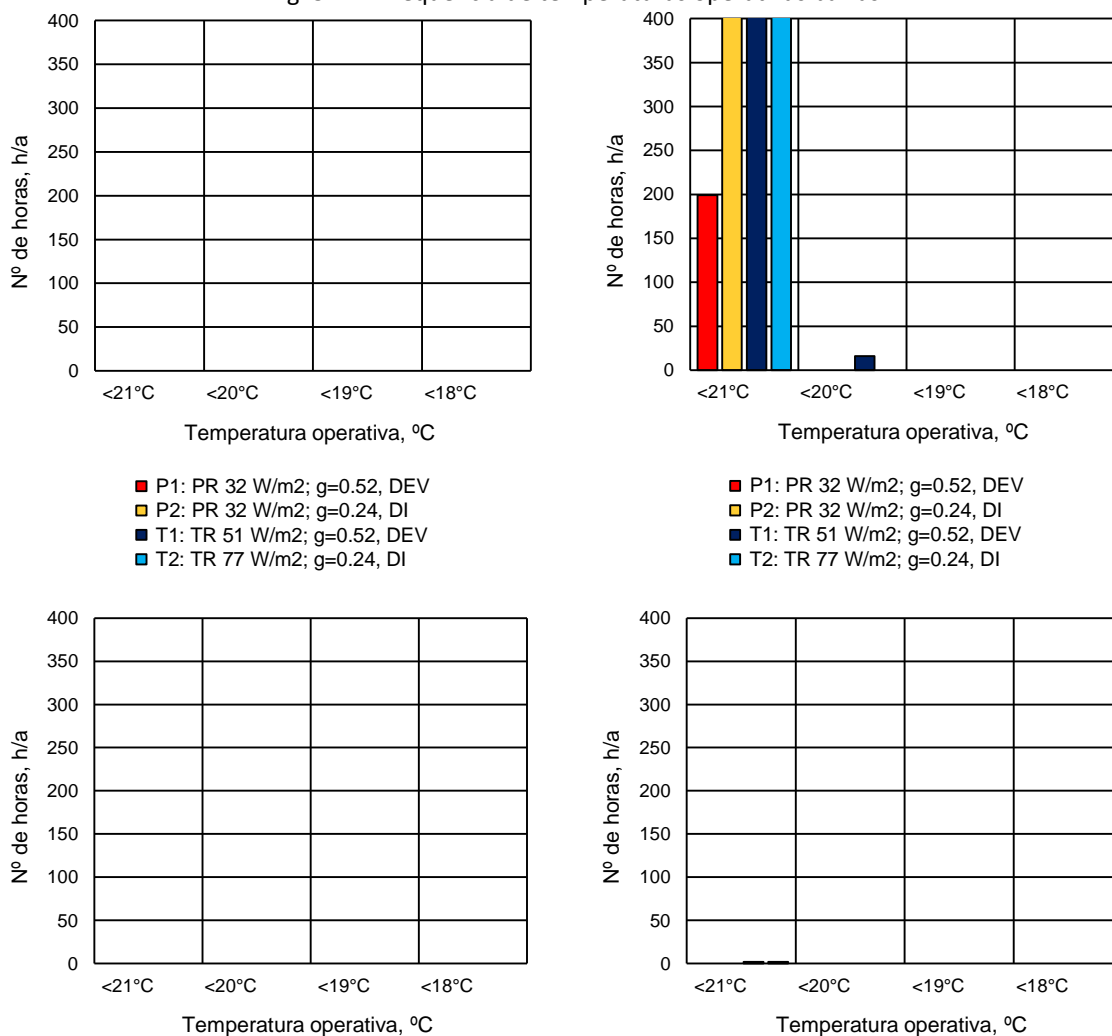
Fig. 5-II – Temperatura operativa e frequências elevadas para 6.01



5.2 Frequências de temperaturas operativas baixas

De seguida apresentam-se as ocorrências de temperaturas operativas baixas para o ano climático típico, para o gabinete 5.02, gabinete 5.05, sala de reuniões 2.05 e sala de conferências 6.01.

Fig. 5-III – Frequência de temperaturas operativas baixas



6. Preços específicos de energia

Os custos de utilização associados aos consumos de energia foram determinados com base nos preços de energia referenciados pelo IPTG. O preço para arrefecimento é obtido considerando o COP de 4.5 do chiller de compressão.

Aquecimento	0,055 €/kWh
Electricidade	0,220 €/kWh
Arrefecimento	0,049 €/kWh

7. Custos específicos de investimento

Os custos específicos dos investimentos considerados para a elaboração da análise económica foram referenciados pela empresa de arquitectura e pelo IPTG.

Fachada envidraçada

Vidro triplo de isolamento térmico com estore veneziano integrado	500 €/m ²
Vidro triplo de controlo solar com estore de lâminas interior	280 €/m ²

Sistema de Piso Elevado Radiante Climalevel

Piso Climalevel	142 €/m ²
Tubagens, bombas e válvulas	500 €/kW

Painel radiante de tecto

Painel	210 €/m ²
Tubagens, bombas e válvulas	450 €/kW

Piso elevado	100 €/m ²
Painel de atenuação acústica	200 €/m ²

Produção de frio

Chiller de compressão	568 €/kW
-----------------------	----------

Geração de calor

Aquecimento urbano	386 €/kW
--------------------	----------

Ventilação e ar condicionado

Sistema de ventilação	15 €/m ³ /h
-----------------------	------------------------

Este custo corresponde ao sistema de ventilação completo, englobando ventiladores de insuflação e extracção, baterias de aquecimento e de arrefecimento, recuperador de calor e sistema de condutas de ar.





8. Relatórios de simulação IDA ICE

De seguida apresentam-se os resultados de simulação transcritos dos relatórios de simulação gerados pela aplicação IDA ICE para cada variante.

Variante P1





Delivered Energy Report

Delivered Energy Overview



		Delivered energy		Cost		Primary energy	
		kWh	kWh/m ²	€	€/m ²	kWh	kWh/m ²
	Lighting, facility	10441	11.3	2297	2.5	27146	29.4
	Electric cooling	4094	4.4	901	0.9	10644	11.5
	HVAC aux	12617	13.7	2776	3.0	32803	35.5
	District heating	47263	51.2	2599	2.8	7562	8.2

Systems Energy

Used energy kWh (sensible and latent)

	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling
				
Total	34127.7	14076.4	13138.3	4346.6





Auxiliary energy kWh

	Fans	Pumps
		
Total	11986.0	631.1

Variante T1





Delivered Energy Report

Delivered Energy Overview



		Delivered energy		Cost		Primary energy	
		kWh	kWh/m ²	€	€/m ²	kWh	kWh/m ²
	Lighting, facility	10442	11.3	2297	2.5	27150	29.4
	Electric cooling	4155	4.5	914	0.9	10804	11.7
	HVAC aux	12575	13.6	2766	3.0	32695	35.4
	District heating	46684	50.6	2568	2.8	7469	8.1

Systems Energy

Used energy kWh (sensible and latent)

	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling
				
Total	33135.6	14415.2	13548.7	4282.4





Auxiliary energy kWh

	Fans	Pumps
		
Total	11986.2	588.4

Variante T2





Delivered Energy Report

Delivered Energy Overview



		Delivered energy		Cost		Primary energy	
		kWh	kWh/m ²	€	€/m ²	kWh	kWh/m ²
	Lighting, facility	12874	14.0	2832	3.1	33473	36.3
	Electric cooling	3273	3.5	720	0.8	8509	9.2
	HVAC aux	12567	13.6	2765	3.0	32673	35.4
	District heating	51618	55.9	2839	3.1	8259	8.9

Systems Energy

Used energy
kWh (sensible and latent)

	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling
				
Total	37831.6	10521.3	13786.6	4204.6

Auxiliary energy
kWh

	Fans	Pumps
		
Total	11986.5	580.5

9. Folhas de cálculo

9.1 Consumo energético

		Variante P1	Variante T1	Variante T2
Solução	de climatização	Piso Climalevel	Tecto Radiante	Tecto Radiante
	de fachada	g=0.52, estore integrado	g=0.52, estore integrado	g=0.24, estore interior
Aquecimento kWh/a	Consumo térmico	47.263	46.684	51.618
	UTA	13.135	13.548	13.786
	Superfície radiante	34.128	33.136	37.832
Arrefecimento kWh/a	Consumo eléctrico	4.094	4.155	3.273
	Consumo térmico	18.423	18.698	14.729
	UTA	4.347	4.282	4.207
	Superfície radiante	14.076	14.415	10.521
Electricidade kWh/a	Iluminação	10.441	10.442	12.874
	Ventiladores	11.986	11.986	11.987
	Bombas	631	588	581
Energia primária, kWh/a	Aquecimento	7.562	7.469	8.259
	Arrefecimento	10.644	10.803	8.510
	Electricidade	59.951	59.843	66.147
	Total	78.158	78.116	82.915
Custos energéticos €/a	Aquecimento	2.599	2.568	2.839
	Arrefecimento	901	914	720
	Iluminação	2.297	2.297	2.832
	Ventiladores e Bombas	2.776	2.766	2.765
	Total	8.573	8.545	9.156

Tabela 9-I – Consumo energético

9.2 Rentabilidade económica

		Variante P1	Variante T1	Variante T2
Solução	de climatização	Piso Climalevel	Tecto Radiante	Tecto Radiante
	de fachada	g=0.52, estore integrado	g=0.52, estore integrado	g=0.24, estore interior

Especificações das variantes	Área dos vãos envidraçados, m²	496	496	496
	Piso Climalevel, m²	664	162	162
	Tecto Radiante, m²	0	201	301
	Painel de Atenuação Acústica, m²	225	0	0
	Piso Elevado, m²	0	502	502
	Capacidade máx. piso radiante, kW	20,9	5,1	5,1
	Capacidade máx. tecto radiante, kW	0,0	25,7	38,6
	Preço da fachada envidraçada	500	500	280

Energia	Aquecimento, kWh/a	47.263	46.684	51.618
	Arrefecimento, kWh/a	18.423	18.698	14.729
	Iluminação, kWh/a	10.441	10.442	12.874
	Ventiladores e Bombas, kWh/a	12.617	12.575	12.567
	Pico de carga de aquecimento, kW	70	70	70
	Pico de carga de arrefecimento, kW	38	41	49
	Caudal de ar, m³/h	7.805	7.805	7.805

Custos de investimento, €	Geração de calor	27.020	27.020	27.020
	Produção de frio	21.584	23.288	27.832
	Superfície radiante	104.733	79.284	106.149
	Ventilação e ar condicionado	117.075	117.075	117.075
	Fachada envidraçada	248.000	248.000	138.880
	Piso Elevado	0	50.196	50.200
	Painel de Atenuação Acústica	45.000	0	0
	Total	563.412	544.864	467.156

Custos de Utilização, €	Aquecimento	2.599	2.568	2.839
	Arrefecimento	901	914	720
	Iluminação	2.297	2.297	2.832
	Ventiladores e Bombas	2.776	2.766	2.765
	Manutenção Técnica	4.056	3.700	4.171
	Total	12.629	12.245	13.327

Valor actual líquido, €	Custos energéticos	178.868	178.293	191.035
	Manutenção Técnica	67.353	61.438	69.262
	Custos de investimento	563.412	544.864	467.156
	Total	809.634	784.595	727.453

Custo Total Anual, €/a	Custos energéticos	13.335	13.292	14.242
	Manutenção Técnica	5.021	4.580	5.163
	Serviço de dívida	42.002	40.619	34.826
	Total	60.358	58.491	54.231

Tabela 9-II – Rentabilidade económica

10. Sombreamento da fachada

Nas páginas seguinte são apresentadas as imagens do sombreamento das fachadas do banco pelos edifícios vizinhos durante dois dias do ano climático: 20 Junho e 22 de Setembro.

Fig. 10-I – Sombreamento das fachadas do banco no dia 20 de Junho

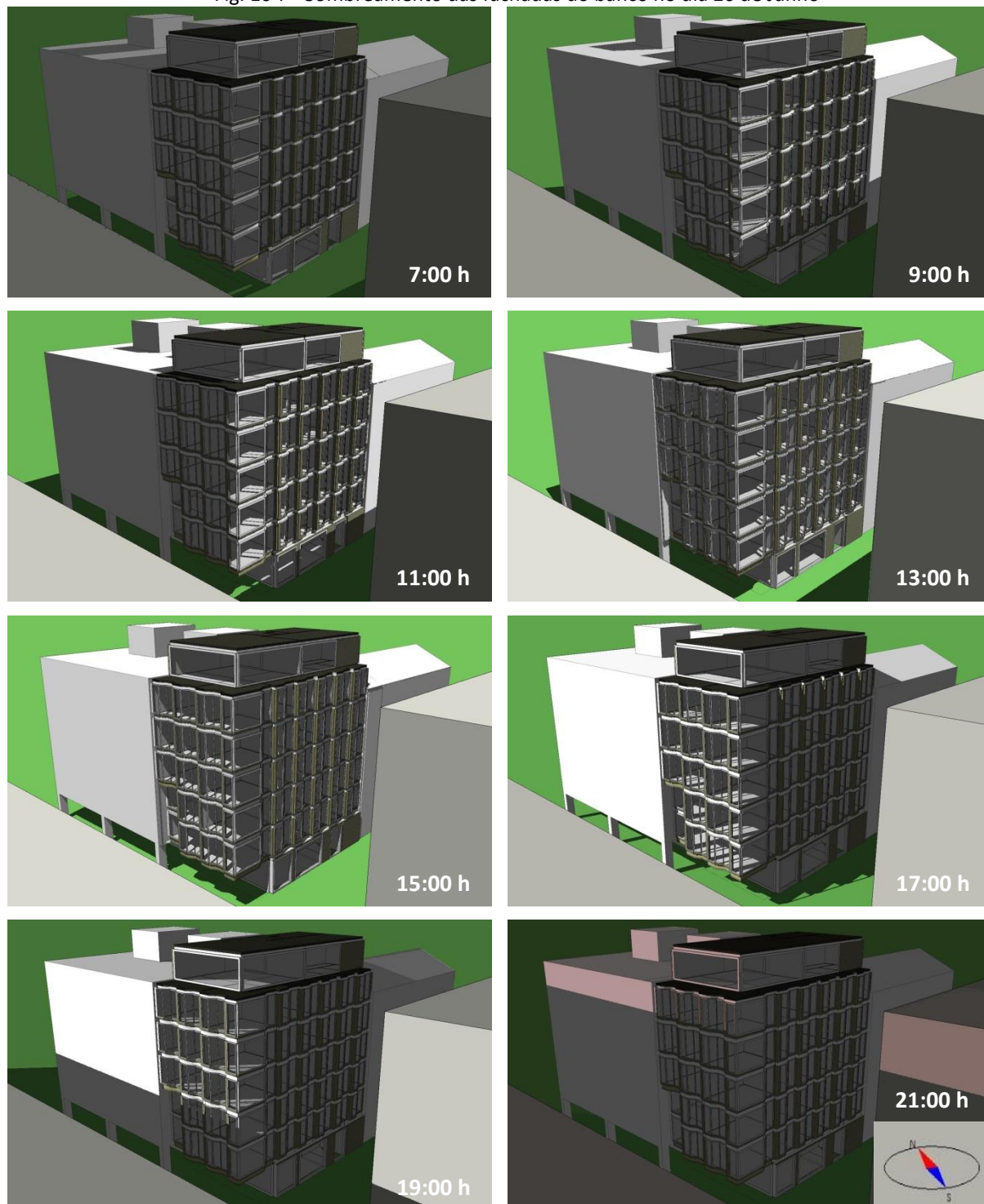


Fig. 10-II – Sombreamento das fachadas do banco no dia 22 de Setembro

